Examensarbete inom teknik

Grundnivå, 15 hp

Implementering av vanadin redox-batterier som energilager i fastigheter

Teknisk och ekonomisk utvärdering med en komparativ studie av litium-jon-batterier samt en fallstudie av Haga slott

JANNI BISTER OCH JOHANNA LINDSTEDT

KTH Industrial Engineering and Management

Bachelor of Science Thesis EGI-2024

TRITA-ITM-EX 2024:205

Implementering av vanadin redox-batterier som energilager i fastigheter

Janni Bister
Johanna Lindstedt

Approved	Examiner	Supervisor
Date	Per Lundqvist	Jonas Anund Vogel Per Lundqvist
	Commissioner	Contact person

Sammanfattning

Denna studie syftar till att utvärdera tekniska och ekonomiska aspekter av att installera vanadin-redox-flödesbatterier (VRFB) i fastigheter. Studien omfattar både en litteraturstudie och en fallstudie av Haga slott, med målet att identifiera ekonomiska incitament för energilagring i fastigheter, samt att utvärdera VRFB som ett konkurrenskraftigt alternativ till litiumjonbatterier (LiB) för tillämpning i byggnader. I fallstudien jämförs två investeringsalternativ, ett VRFB och ett LiB.

Litteraturgranskningen sammanfattar resultat från tidigare studier kring VRFB, ekonomiska och incitament kopplade till batterilager i byggnader samt tekniska fördelar och nackdelar med VRFB gentemot LiB. I fallstudien jämförs ett VRFB med en lagrignskapacitet på 120 kWh och en i-och urladdningskapacitet på 15 kW med ett LiB med en lagringskapacitet på 560 kWh och en i- och urladdningseffekt på 460 kW. Investeringskalkyleringen inkluderar en nettonuvärdesanalys samt en analys av återbetalningstiden för de två alternativen. Kostnad per kWh och cykel beräknas också för att få en översikt över de rörliga kostnaderna.

Studien visar att det största ekonomiska incitamentet för en investering i ett batterilager är möjligheten att leverera stödtjänster till SVK. Kapning av effekttoppar och försäljning av el är också intressanta ekonomiska aspekter, men intäkter och kostnadsbesparingar från dessa små i förhållande till intäkterna från balansmarknaden. Nettonuvärdesanalysen visar att investeringen i ett VRFB inte är ekonomiskt försvarbar för Haga slott, medan investeringen i LiB är lönsam. Den initiala investeringskostnaden är förknippad med osäkerheter. Återbetalningstiden för LiB beräknas till cirka två år, medan VRFB beräknas återbetalas på mellan sex och 36 år, beroende på investeringskostnaden och framtida kapacitetsersättning från SVK. Kostnaden per kWh och cykel är generellt lägre för VRFB än för LiB.

En teknisk fördel VRFB är dess skalbarhet, eftersom energilagringskapacitet och i- och urladdningseffekt är åtskilda. VRFB är mindre känsliga för djup urladdning och temperaturförhållanden än LiB, vilket möjliggör en lång livslängd och många cykler. VRFB har däremot lägre energitäthet och verkningsgrad jämfört med LiB. De effektrelaterade investeringskostnaderna (SEK/kW) är höga, medan de variabla kostnaderna (SEK/kWh) är låga jämfört med LiB. Marknaden för VRFB är fortfarande i ett tidigt stadium, med befintliga anläggningar främst som pilot- och testanläggningar. VRFB betraktas som en viktig teknologi inom långvariga energilagringssystem (LDES) för att hantera intermittens från förnybara energikällor.

Sammanfattningsvis är flödesbatterier en lovande teknologi för framtida energilagring. För närvarande är teknologin dock inte ekonomiskt attraktiv för en enskild fastighetsägare.

Abstract

This bachelor thesis is conducted through a literature review and a case study of Haga slott, a hotel with a spa located in Enköping, Sweden. The literature review summarizes previous research on VRFBs, economic incentives for energy storage in buildings, and the current market situation for VRFBs. The case study evaluates two investment options: a 120 kWh VRFB with a 15 kW charge/discharge capacity and a 560 kWh LiB with a 460 kW charge/discharge capacity. Investment calculations include a net present value analysis and a payback period analysis. Variable costs per kWh and cycle are also calculated, along with sensitivity analyses on initial investment costs and capacity compensation prices from the balancing market.

The main economic incentive for battery storage investment is participating as a provider of ancillary services for the Swedish transmission system operator (Svenska Kraftnät, SVK). Peak shaving and electricity sales are also considered, but previous studies indicate that savings from these are minor compared to potential revenues from the balancing market. Therefore, the economic analysis focuses solely on revenue streams from the balancing market.

The net present value analysis concludes that VRFB investment is not economically viable for Haga slott, while LiB investment is profitable. Along with uncertainties in VRFB's initial investment cost, and that the payback period for LiB is remarkably shorter than for VRFB it is apparent that VRFB is not a profitable investment compared to LiB.

Technically, the primary advantage of VRFBs is their scalability, as energy storage capacity and charge/discharge power are decoupled. VRFBs also tolerate deep discharges and various temperature conditions better than LiBs, leading to long life cycles and high cycle stability. However, VRFBs have lower energy density and efficiency compared to LiBs. The investment costs related to power (SEK/kW) are high, while the variable costs (SEK/kWh) are low relative to LiB. The market for VRFBs is still in its early stages, with existing installations mainly being pilot or test facilities. VRFBs are part of the long-duration energy storage (LDES) category, which is crucial for addressing intermittency issues as renewable energy sources comprise a larger share of the energy system.

In summary, while VRFBs are a promising technology for future energy storage, substantial research and development are still required. Currently, from an economic perspective, VRFB technology is not viable for investment by individual property owners.

Innehållsförteckning

Sammanfattning I
Abstract II
Innehållsförteckning III
Tabeller V
Nomenklatur VI
1 Introduktion 1
1.1 Problemformulering 2
1.2 Syfte & Mål 2
1.3 Frågeställningar 3
1.4 Avgränsningar 3
2 Metod 3
2.1 Litteraturstudie 3
2.2 Fallstudie: Haga Slott 4
2.2.1 Nuvärdesmetoden 4
2.2.2 Payback-metoden 4
2.2.3 Känslighetsanalys 5
3 Litteraturgranskning 5
3.1 Elnätsavtal & Elhandel 5
3.1.1 Elnätsavtal 5
3.1.2 Elhandelsavtal 6
3.2 Effekttoppar och energilagring 6
3.3 Svenska Kraftnäts Balansmarknad 6
3.3.1 Vad är balansering? 6
3.3.2 Stödtjänster och avhjälpande åtgärd 7
3.3.3 Leverans av stödtjänster 10
3.4 Batterilager i fastigheter 10
3.4.1 Flödesbatterier 11
3.4.2 Litiumjon-batterier 11
3.4.3 Långvariga energilagringssystem 12
3.5 Tidigare och pågående studier 12
3.5.1 Dalian Flow Battery Energy Storage Peak-Shaving Power Station 13
3.5.2 Lithium-based vs Vanadium Redox Flow Batteries 13
3.5.3 Analys av lönsamhetsstrategier för elnätsanslutet batteri i en kommersiell fastighet 13
4 Fallstudie: Haga slott 14
4.1 Investeringskostnad för VRFB 15

4.2 Intäkter från deltagande på marknaden för FCR-D ned och FCR-D upp 16
4.3 Nettonuvärdeanalys 18
4.4 Återbetalningstid 20
4.5 Kostnader per kWh och cykel 21
5 Diskussion 22
5.1 Ekonomisk diskussion 22
5.2 Teknisk diskussion 25
6 Slutsatser 26
7 Referenser 28

Tabeller

Tabell 1. Volymkrav för stödtjänster av reserver 2024.

Tabell 2. Förkvalificerade volymer för energilager på marknader för reserver.

Tabell 3. Egenskaper för studerat VRFB.

Tabell 4. Egenskaper för studerat LiB.

Tabell 5. Underlag för beräkning av investeringskostnaden för VRFB.

Tabell 6. Investeringskostnad för VRFB baserat på Wood MacKenzies marknadsanalys för LDES.

Tabell 7. Investeringskostnad för VRFB baserat på uppskattning från Pinflow.

Tabell 6. Avgift till aggregator och BSP.

Tabell 9. Intäktsströmmar från balansmarknaden för VRFB.

Tabell 10. Intäktsströmmar från balansmarknaden för LiB.

Tabell 11. Nettonuvärde för VRFB, Analys av hur investeringsnivå och årlig prisförändring på FCR-D ned och upp påverkar nettonuvärdet för VRFB.

Tabell 12. Nettonuvärdet för LiB. Analys av hur prisförändringar på FCR-D ned och upp påverkar nettonuvärdet för LiB.

Tabell 13. Payback-tid för VRFB. Analys av hur investeringsnivå och prisförändringar på FCR-D ned och upp påverkar återbetalningstiden.

Tabell 14. Payback-tid för LiB. Analys av hur investeringsnivå och prisförändringar på FCR-D ned och upp påverkar återbetalningstiden.

Tabell 15. Kostnad per kWh och cykel VRFB

Tabell 16. Kostnad per kWh och cykel LiB.

Nomenklatur

Förkortningar

VRFB	Vanadium Redox Flow Batteries
LiB	Lithium-ion Battery
LDES	Long Duration Energy Storage
SDES	Short Duration Energy Storage
SVK	Svenska kraftnät
FCR	Frequency Containment Reserv
FCR-D	Frequency Containment Reserv- Disturbance
FCR-N	Frequency Containment Reserv- Normal
FFR	Fast Frequency Reserv
BSP	Balancing Service Provider
aFRR	Automatic Frequency Restoration Reserve
mFRR	Manual Frequency Restoratin Reserve
WACC	Weighted Average Cost of Capital
PV	Present Value
NPV	Net Present Value

1 Introduktion

År 2022 blev det tydligt hur beroende och utsatt Europa och dess länder är när det kommer till el och energiförsörjning. Rysslands invasion av Ukraina och de sanktioner som riktades mot landet tätt inpå skapade ett politiskt maktspel kring energi, vilket i sin tur bidrog till stora konsekvenser på energimarknader runt om i Europa. Energibristen som uppstod delvis till följd av dessa sanktioner, medförde höga energipriser som drabbade både privatpersoner och företag i Europa hårt (Europeiska rådet, 2024). Även om läget på energimarknaden återhämtat sig en aning sedan dess är det viktigt för alla typer av verksamheter att kunna bemöta toppar då efterfrågan på el är hög, såsom under vinterhalvåret, och skydda sin egen verksamhet då tillgången på energi är låg.

Förutom energikriser hängandes över Europa förväntas efterfrågan på el att växa i framtiden (Oljemark, 2023). Samtidigt ska länder gå mot en mer hållbar och grön energiomställning. Till 2045 har Sverige ett klimatmål att utsläpp av växthusgaser ska vara nettonoll (Naturvårdsverket, 2024), vilket kommer kräva en stor andel förnybara energikällor. Många av dessa förnybara energikällor är dock mindre pålitliga när det gäller en kontinuerlig energiproduktion, eftersom de är väderberoende. Detta kommer kräva ändrade förutsättningar för balanseringen av kraftsystemet (Svenska kraftnät, 2024), för att garantera en pålitlig tillgång av energi.

Utifrån detta uppstår frågor kring vad det finns för möjligheter för fastighetsägare och privatpersoner att både garantera sin egen energisäkerhet, men även hur man kan hjälpa till med avlastning och balansering av elnätet i framtiden. Detta är högst relevanta funderingar, dels för att säkerställa sin egna energitillgång vid eventuella framtida kriser eller energibrister, och dels för att bidra till en mer hållbar energianvändning.

Redan idag finns det olika lösningar för fastighetsägare rörande detta, nämligen energilagringsenheter. En typ av energilagringsenhet som går att använda är batterier. Dessa kan användas för att lagra energi antingen under timmar med lägre elpris, eller via exempelvis solceller, för att sedan hjälpa till med energiförsörjning när behovet är som störst (MVS, u.d.). Myndigheten Svenska kraftnät (SVK) köper dessutom upp så kallade reserver för att hjälpa till med balansering av elnätet (Svenska kraftnät, 2023), något som fastighetsägare med batterilager kan vara leverantörer av och således få ersättning av. På så vis erbjuder en energilagringslösning med batterier både en säkrare tillgång till energi och en möjlighet att dra ekonomiska fördelar.

Fastigheter med energilagring har även möjlighet att kapa sina effekttoppar som ofta uppstår under exempelvis kallare väder då både energiförbrukning och effektuttag ökar. Eftersom det ofta är många som samtidigt behöver mer eluttag höjs belastningen på elnätet vilket även medför att priserna för att leverera el höjs (MVS, u.d.). Med hjälp av ett batterilager kan effekttopparna sänkas, vilket kan medföra billigare energi.

KTHs forskningscenter Dig-IT-lab, som fokuserar på utvecklingen av digitalisering i byggbranschen (KTH, 2023), har nyligen intresserat sig för en viss typ av batteri och dess potential i byggnader. Batteriet är ett så kallat flödesbatteri, och har tidigare inte storskaligt används inom byggnader med syfte att fungera som just energilagring. Nu vill man undersöka

en viss typ av flödesbatterier, nämligen Vanadium Redox Flow Batteriers (VRFB), och möjligheterna denna typ av energilager erbjuder fastigheter.

Detta projekt utgår från en fallstudie på Haga slott som gått med på att delta i ett projekt drivet av KTH kring VRFB. Om KTH-projektet blir godkänt kommer ett VRFB om 120 kWh att installeras på slottet. Med installationen vill man undersöka om batteriet kan vara av intresse för effektivisering av energianvändning genom energilagring och kapning av effekttoppar.

Incitament för att installera ett VRFB kommer att analyseras ur ett ekonomiskt och ett tekniskt perspektiv. Den ledande tekniken för batterilagring i byggnader är idag litiumjon-batterier (Lithium-ion-Battery, LiB) (Engvall, 2021) (Uhrig, 2016). VRFB kommer av denna anledning att ställas mot LiB för att avgöra dess ekonomiska, tekniska och konkurrenskraftiga potential. Således kommer projektet fokusera på att avgöra VRFBs potential i byggnader både tekniskt och ekonomiskt, samt vilka övriga incitament som kan komma med installationen av batteriet.

Förutom att vara relevant för att bidra till en säkrare och mer hållbar energiförbrukning, är projektet även intressant ur ett större samhällsperspektiv kopplat till FNs globala hållbarhetsmål. Arbetet går framför allt hand i hand med mål nummer 7; *hållbar energi för alla*, som fokuserar på tillgången av ”hållbar, tillförlitlig och förnybar energi” (FN, 2022), vars delmål fokuserar på att bland annat fördubbla energieffektiviseringen samt främja investeringar i energiinfrakstruktur. Även mål 9; *hållbar industri, innovationer och infrastruktur*, kan kopplas till projektet där bidraget av innovation och tekniska framsteg ska hjälpa till för hållbara lösningar utifrån både ekonomiska och miljömässiga perspektiv (FN, 2022). Projektet kommer att undersöka flödesbatteriers potential för energilagring och energieffektivisering för att fastställa dess ekonomiska hållbarhet, tillförlitlighet samt huruvida de kan bidra till målet kring förnybar energi.

1.1 Problemformulering

För storskaliga verksamheter med ett högt effektbehov och krav på säker elförsörjning är energilagringssystem av särskilt intresse. Flödesbatterier används för närvarande inte i fastighetsbranschen, men intresset för denna teknik har ökat i takt med ökat intresse och krav på förnybar energiproduktion. Denna studie undersöker tekniska och ekonomiska aspekter av att installera flödesbatterier för energilagring i fastigheter. En central fråga är om VRFB kan vara ett konkurrenskraftigt alternativ till LiB.

1.2 Syfte & Mål

Målet med studien är att bedöma de tekniska och ekonomiska möjligheterna och utmaningarna med att implementera ett VRFB i en fastighetsmiljö och att jämföra detta med en implementering av ett LiB. Studien utförs både som en litteraturstudie och som en fallstudie av Haga slott. Litteraturstudien syftar till att identifiera potentiella intäktsströmmar och kostnadsbesparingar som kan uppstå vid installation av ett energilager i en fastighet. Vidare utvärderas hinder och drivkrafter för att göra VRFB till ett konkurrenskraftigt alternativ till LiB för tillämpning i fastigheter. Fallstudien syftar till att utvärdera två investeringsalternativ för Haga slott – ett för ett VRFB och ett för ett LiB – och undersöka deras tekniska och ekonomiska fördelar och utmaningar. Sammanfattningsvis är syftet med studien att bidra till en ökad förståelse för implementering av energilagringssystem i fastigheter genom att analysera och jämföra VRFB ur både tekniska och ekonomiska perspektiv, samt att identifiera faktorer som påverkar deras konkurrenskraft på marknaden.

1.3 Frågeställningar

I denna studie behandlas frågeställningarna:

- *Vilka potentiella intäktsströmmar och kostnadsbesparingar kan en fastighetsägare erhålla genom att investera i batterilager?*
- *Kan en investering i ett VRFB med energilagringskapacitet 120 kWh, i och urladdningskapacitet 15 kW på Haga slott vara lönsam och hur ställer sig denna investering mot en investering i ett LiB med energilagringskapcitet 560 kWh, 460 kW i- och urladdningskapacitet?*
- *Vad finns det för tekniska och ekonomiska hinder och drivkrafter för att göra VRFB till ett konkurrenskraftigt alternativ till LiB i fastighetsbranschen?*

1.4 Avgränsningar

Studiens omfattning sträcker sig till att utvärdera tekniska och ekonomiska aspekter av implementering av VRFB i fastigheter, särskilt fokuserad på en fallstudie av Haga slott i Enköping. I fallstudien jämförs två investeringsalternativ: ett VRFB (120 kWh/15kW) och ett LiB (560 kWh/460 kW).

Geografiskt begränsas studien till svenska förhållanden vad gäller energipolitik. I de ekonomiska analyserna beaktas initiala investeringskostnader och framtida intäkter från balansmarknaden för att beräkna nettonuvärdet och återbetalningstiden. Intäkter från försäljning av el och kostnadsbesparingar från kapning av effekttoppar exkluderas, baserat på tidigare studier som visat att deras bidrag är proportionellt mindre jämfört med intäkter från balansmarknaden.

De tekniska analyserna fokuserar främst på prestanda, livslängd och verkningsgrad. En avgränsning är att inkludera en analys av eventuellt användande av ett värmeåtervinningssystem för att utnyttja spillvärme från flödesbatteriet.

2 Metod

I detta avsnitt beskrivs studiens metodik, inklusive genomförandet av en litteraturstudie och en fallstudie. Metod och tillvägagångssätt för inhämtande av information och data för de två delarna presenteras nedan.

2.1 Litteraturstudie

En kvalitativ litteraturstudien genomförs för att utforska möjliga intäktsströmmar och kostnadsbesparingar relaterade till batterilager i fastigheter, samt för att identifiera hinder och drivkrafter för att VRFB ska bli en konkurrenskraftig teknologi och alternativ till LiB för energilagring i byggnader. Litteraturen består huvudsakligen av vetenskapliga artiklar, medan webbsidor och andra elektroniska källor används i andra hand.

I litteraturgranskning sammanställs teknisk information om VRFB och LiB för att bedöma möjligheter och utmaningar med VRFB som batteriteknologi. Som underlag används huvudsakligen forskningsartiklar hämtade från databasen ScienceDirect, där sökord som ”flow

batteries”, ”vanadium-redox-flow batteries” och ”lithium-ion-batteries” utnyttjats. En central del av den ekonomiska aspekten är möjligheten att delta på SVKs frekvensmarknader. För information kring hur SVKs frekvensmarknader fungerar användes primärkällan SVKs hemsida.

Litteraturgranskningen sammanfattar också resultat från tidigare studier på ämnet. För att kartlägga forskningsläget kring flödesbatterier sammanställs information från ett större forskningsprojekt i Kina (Liu, 2022), en studie som jämfört fördelar och nackdelar med VRFB gentemot LiB för byggnadsapplikationer (Uhrig, 2016), samt ett examensarbete från Uppsala universitet som undersöker lönsamhetsstrategier med att batterilager till elnätet. De förstnämnda studierna valdes på rekommendation av representant från Dig-IT lab medan den andra valdes genom sökning i databasen diva, med sökordet ”batterilager i fastighet” (Khataee, 2024).

2.2 Fallstudie: Haga Slott

I fallstudien jämförs två alternativ till investering i ett batteri för energilagring på Haga slott i Enköping: ett VRFB av varumärket Pinflow och ett LiB av varumärket Polarium. Information kring de två batterityperna hämtas från intern mailkonversation med representant från Pinflow, webbsidan tillhörande Pinflow, samt en offert på ett LiB av varumärket Polarium, vilken en representant från Haga slott delat med sig av (Khataee, 2024) (Pinflow, u.d.) (Dennerstedt, 2024). För investeringskalkyleringen används två huvudsakliga metoder, nuvärdesmetoden och payback-metoden, vilka beskrivs i avsnitten nedan. För beräkningar används verktyget Microsoft Excel.

2.2.1 Nuvärdesmetoden

Nuvärdesmetoden är en metod för investeringskalkylering och kan användas för att uppskatta en investerings lönsamhet. Metoden går ut på att jämföra nuvärdet med den initiala investeringen. Nuvärdet är ett beräknat värde av det framtida kassaflöde som en investering förväntas generera, diskonterat med en förutbestämd kalkylräntesats. Nettonuvärdet (NPV, Net Present Value), är nuvärdet subtraherat med den initiala investeringskostnaden.
Ett positivt värde indikerar att de förväntade framtida intäkterna från investeringen beräknas överstiga den initiala investeringskostnaden, vilket innebär att investeringen förväntas vara lönsam. Formeln för nuvärdesmetoden är:

$$NPV = \sum_{t=0}^{n} \frac{R_t}{(1+i)^t}$$

där Rt är kassaflödet under period t, i är diskonteringsränta och t är år (Fernando, 2024).

2.2.2 Payback-metoden

För att utvärdera de olika investeringsalternativen genomförs också en beräkning på pay-back tid. Payback-tid, eller återbetalningstiden, kan användas för att beräkna hur lång tid det tar innan inbetalningsöverskottet från investeringen motsvarar grundinvesteringen.
Formeln för payback-tiden är:

$$Paybacktid = \frac{Investeringskostnad}{Genomsnittligt\ årligt\ kassaflöde}$$

Payback-metoden är en vanlig metod för investeringskalkylering, speciellt vid investeringar som måste återbetalas snabbt. Metoden tar inte hänsyn till pengars tidsvärde eller effekten av inflation och är därför mindre lämplig för mer långsiktiga projekt. Vid en jämförelse av två investeringar är tumregeln att den investering med kortast återbetalningstid är mer fördelaktig. För att kunna avgöra om investeringen är lönsam eller inte behöver payback-tiden jämföras med ett förutbestämt värde. Värdet kan exempelvis väljas till investeringens ekonomiska livslängd, vilket motsvarar den tid som investeringen förväntas vara företagsekonomiskt lönsam (Kagan, 2024).

2.2.3 Känslighetsanalys

Genom att utföra känslighetsanalyser kan vi få en bättre förståelse för risker och osäkerheter kring investeringsalternativen. För nuvärdesmetoden är det intressant att analysera hur förändringar i förväntade kassaflöden påverkar NPV. För VRFB är dessutom den initiala investeringskostnaden okänd och även denna parameter kan justeras för att bedöma investeringens känslighet för olika scenarier. Även för payback-metoden undersöks hur förändringar i den initiala investeringskostndaden samt genomsnittliga årliga kassaflöden påverkar återbetalningstiden. I undersökningen inkluderas också en beräkning av kostnad per kWh och cykel. För denna undersöks hur parametern antalet cykler för LiB påverkar kostnaden per kWh och cykel. För VRFB undersöks hur den initiala investeringskostnaden påverkar kostnad per kWh och cykel.

3 Litteraturgranskning

3.1 Elnätsavtal & Elhandel

Alla fastigheter som bedriver en verksamhet behöver ha tillgång till energi för att bedriva verksamhetens olika aktiviteter. Avtalen för inköp av el och effekt består av två delar, ett elnätsavtal och ett elhandelsavtal. Elnätsavtalet kontrakteras med elnätsbolag, medan elhandelsavtalet kontrakteras med ett elhandelsbolag. Elnätsbolagen är de som äger själva ledningarna i ett område och varje elnätsbolag har ett enskilt monopol över ett visst område. Elhandelsbolagen och andra sidan är de som återförsäljer el till konsumenter och företag, och agerar på en öppen marknad (Nüüd, 2024).

3.1.1 Elnätsavtal

Elnätsavtalet är uppdelad i en fast och en rörlig avgift. Den fasta avgiften, kallad abonnemangsavgift, beror på säkringens storlek, där en högre säkring ger en högre fast månadsavgift. Den rörliga delen av avtalet, överföringsavgiften, motsvarar direkt hur mycket el som förbrukas. Överföringsavgiften blir alltså högre ju mer el som förbrukas, då en högre förbrukning kräver en större transport av el vilket leder till en dyrare avgift (Nüüd, 2024).

Vilken säkringsstorlek som väljs till abonnemangsavgiften beror på hur mycket ström som behövs vid den högsta möjliga belastningen (Konsumenternas Energimarknadsbyrå, 2022). Fastigheter som behöver kunna ta ut en stor andel ström under högbelastning behöver alltså en större säkring och således blir abonnemangsavgiften dyrare.

Priset för överföringsavgiften är oftast några öre per kilowattimme (öre/kWh). Det är dock viktigt att notera att priset för överföringsavgiften inte beror på spotpriset av el (Konsumenternas Energimarknadsbyrå, 2022). Den beror istället bland annat på hur stora förluster som uppstår när elen transporteras och överförs. Den förlorade elen behöver nämligen

ersättas vilket överföringsavgiften ska täcka. Dessutom påverkas oftast överföringsavgiften också av det regionala elnätet och hur aktörerna där prissätter överföringen till elnätsbolaget (Göteborg energi, u.d.).

3.1.2 Elhandelsavtal

Det andra avtalet konsumenter tecknar är elhandelsavtalet som motsvarar kostnaderna för den el som används under en månad (Nüüd, 2024).

För elpriset går det att välja mellan framför allt två olika typer av avtal, antingen ett avtal med rörligt elpris eller ett med fast elpris (Energimarknadsinspektionen, 2021). Med ett fast avtal kommer varje månadsanvändning av el kosta lika mycket och avtalet är ofta bundet under en längre tid. Ett rörligt elprisavtal följer istället priserna på marknaden och kostnaden för varje förbrukad kWh beror på hur elmarknaden ändras timme för timme (Fyrfasen, u.d.).

3.2 Effekttoppar och energilagring

Effekt är en fysikaliskstorhet, vilken mäts i Watt [W], och motsvarar den energimängd som överförs i en viss tidpunkt mellan två system. Den el som används i en viss tidpunkt motsvarar alltså effekten och ju mer effekt eller el som krävs desto högre blir den s.k. effekttoppen. Alltså, vid tillfällen då många elektriska apparater, eller annat som kräver elektricitet, är i gång kommer effekttoppen bli högre.

De största effekttopparna uppstår oftast när det är kallt eftersom det då oftast krävs en större energiförbrukning och således ett större effektuttag. Dessa effekttoppar bidrar ofta till en högre belastning på elnätet när många behöver mycket energi samtidigt, vilket gör det dyrare för elbolagen att leverera el. Det blir på så sätt även dyrare för konsumenter eftersom elpriset stiger. Ofta kommer elbolagen då behöva köpa in el från andra leverantörer för att hålla en jämn nivå i elnätet, el som inte sällan är mindre grön (MVS, u.d.).

Genom energilagringslösningar kan man kapa effekttopparna, vilket inte bara bidrar till en ökad användning av förnybar energi, utan även minskar belastningen på elnätet och sänker den egna energikostnaden. Genom att exempelvis använda batterier som lagrar energi från elnätet när elpriset är lågt för att sedan använda den lagrade energin i batteriet när behovet är som störst, kan effekttopparna kapas och effektnivån jämnas ut (MVS, u.d.).

3.3 Svenska Kraftnäts Balansmarknad

3.3.1 Vad är balansering?

I det svenska kraftsystemet vill man upprätthålla en balans mellan förbrukning och produktion av el i varje sekund. Med andra ord, att det hela tiden produceras och konsumeras lika mycket el. Balansen mäts genom att mäta frekvensen i elnätet. Då frekvensen är 50 Hz är systemet i balans. När frekvensen avviker från denna siffra uppstår en obalans som antingen beror på att det produceras mer el än det förbrukas eller det omvända. Obalanser kan bero på olika störningar och förändringar som påverkar produktion och konsumtion, exempelvis oförutsägbara förändringar i vädret (Svenska kraftnät, 2023).

Balansen är viktig för att kraftsystemet ska fungera och leverera el effektivt. Svenska kraftnät ansvarar för balanseringen av kraftnätet och reglerar i realtid balanseringen av kraftsystemet. Vid förändringar eller oförutsägbara störningar måste det finnas reserver som tillfälligt kan användas för att reglera upp eller ner frekvensen i systemet. Dessa reserver ser SVK till att ha handlat upp både före och under drifttimmarna, för att kunna reglera frekvensen i elnätet direkt

när det behövs. Reserverna kommer från olika typer av tekniker vars förbrukning går att reglera, såsom exempelvis batterier (Svenska kraftnät, 2023).

3.3.1.1 Upp- och nedreglering

När det uppstår en obalans och frekvensen i elnätet avviker från 50 Hz åtgärdas detta av SVK genom antingen en upp- eller nedreglering. En uppreglering sker då frekvensen understiger 50 Hz och det konsumeras mer el än vad som produceras. Då regleras systemet tillbaka upp till 50 Hz genom att man sätter in reserverna som antingen ökar sin produktion eller minskar sin förbrukning (Svenska kraftnät, 2023).

Om frekvensen istället överstiger 50 Hz produceras mer el än vad som förbrukas i systemet. När detta händer använder man sig av en nedreglering och systemets reserver minskar antingen sin produktion och/eller ökar sin förbrukning tills dess att kraftsystemet återigen har en frekvens på 50 Hz (Svenska kraftnät, 2023).

3.3.2 Stödtjänster och avhjälpande åtgärd

Det finns olika typer av reserver som SVK använder sig av, dessa reserver kan bidra med så kallade stödtjänster. Stödtjänsterna hjälper till att återgälda olika problem i elnätet och samtidigt ger de även möjligheter för företag och privatpersoner att hjälpa till med stabiliteten i elsystemet vilket de får ekonomisk ersättning för. SVK erbjuder följande stödtjänster: FCR-D ned, FCR-D upp, FCR-N, aFRR och mFRR, samt en så kallad avhjälpande åtgärd FFR (Svenska kraftnät, 2023) (Vattenfall, 2024).

Enligt SVK är behovet av nya leverantörer av reserver stort då marknaderna för dessa växer i takt med behovet av frekvensreglering (Svenska kraftnät, 2024). Att behovet av frekvensreglering ökar är tätt sammanflätat med den ökade andelen förnybara energikällor i kraftsystemet (Högberg, 2020), något som kan förklaras med att förnybara energikällor har intermittent produktion.

Volymbehovet av de olika stödtjänsterna varierar och SVK uppskattar att volymkravet för framför allt FCR-D samt mFRR kommer öka i framtiden (Svenska kraftnät, 2024). I tabell 1 nedan presenteras det uppskattade volymbehovet av de olika stödtjänsterna i Sverige 2024.

Tabell 1. Volymkrav för stödtjänster av reserver 2024.

	FCR-D ned	FCR-D upp	FCR-N	aFRR	mFRR	FFR
Volymkrav (MW)	547	567	235	217	1100	100

Kommentar: Volymkraven för FCR-D, aFRR och mFRR uppskattas maximalt gå upp till siffran som visas i tabellen och kan alltså bli lägre. Beroende på utvecklingen kan dock alla siffrorna komma att ändras (Svenska kraftnät, 2024).

Svenska Kraftnät måste se till att det finns tillgång på reserver som motsvarar volymkravet varje timme året runt (Svenska kraftnät, 2024). Exempelvis måste det alltså hela tiden finnas 547 MW i reserver till FCR-D ned ifall att det en timme skulle behövas den mängd i reserv.

Utbudet på marknaden av reserver varierar mellan olika kraftslag. Vattenkraft är det kraftslag där utbudet för de olika stödtjänsterna är som allra störst. För energilager, som exempelvis batterier, är det framförallt FFR, FCR-D ned och FCR-D upp som är av intresse eftersom dessa är de med störst utbud i den kategorin (Svenska kraftnät, 2024). SVK förutspår dessutom att marknaderna för reserver väntas växa i framtiden och att volymbehoven från olika kraftreserver

kommer öka (Svenska kraftnät, 2024). Nedan ges en mer detaljerad genomgång av de olika stödtjänsterna som SVK erbjuder.

3.3.2.1 FCR-D ned

FCR-D ned (downwards Frequency Containment Reserve - Disturbance) är en automatisk frekvenshållningsreserv som aktiveras mellan 50,1- 50,5 Hz och används således vid störd drift då nedreglering krävs (Svenska kraftnät, 2024). Tjänsten syftar på så sätt till att minska elproduktionen eller öka konsumtionen för att stabilisera ned frekvensen i elnätet. FCR-D ned är den tjänst som hanterar situationer då det finns ett överskott av el i elnätet.

FCR-D ned budas och handlas på en marknad som Sverige delar med Danmark. För att kunna delta i FCR-D ned måste man uppfylla vissa krav. Några av dessa krav är:
En minsta budvolym på 0,1 MW,
Uppfylla en viss aktiveringstid,
Kunna leverera det man budat i minst 20 minuter vid 100% aktivering (Svenska kraftnät, 2024).

Handeln och prissättningen av FCR-D ned sker genom två kompletterande auktioner dagen innan planerad leverans. De bud som SVK handlar upp, så kallade avropade bud, får en ersättning kallad kapacitetsersättning. Denna ersättning prissätts genom marginalpris, vilket innebär att det dyraste avropade budet sätter priset för alla andra avropade bud från auktionen där resursen upphandlats. Buden lämnas per elområde i Sverige och ersättningen i SE1 kan därför variera mot den i SE2, SE3 och SE4 (Svenska kraftnät, 2024).

3.3.2.2 FCR-D upp

FCR-D upp (upwards Frequency Containment Reserve - Disturbance) är motsatsen till FCR-D ned och används då frekvensen i elnätet understiger 50 Hz (aktiveras automatiskt mellan 49,9-49,5 Hz) och uppreglering krävs (Svenska kraftnät, 2024). I kontrast till FCR-D ned, ser FCR-D upp till att öka produktionen från reserver eller minska konsumtionen för att stabilisera elnätet.

Kraven för att få vara med och buda på FCR-D upp motsvarar de för FCR-D ned. Även handeln med FCR-D upp och dess prissättning fungerar på samma sätt som för FCR-D ned men i motsatt riktning. Det sker alltså två kompletterande auktioner dagen innan leverans och avropade bud ersätts med kapacitetsersättning (Svenska kraftnät, 2024). Precis som i FCR-D ned lämnas buden även för FCR-D upp per elprisområde.

3.3.2.3 FCR-N

FCR-N (Frequency Containment Reserve - Normal) är en automatiskt aktiverad frekvenshållningsreserv som har en symmetrisk produktion (reglerar både upp och ned) och aktiveras i frekvensintervallet 49,9-50,1 Hz (Svenska kraftnät, 2024). Tjänsten är menad att var aktiv under timmar med normala driftförhållanden utan några märkbara störningar. FCR-N fungerar som en grundläggande stödtjänst och är mycket viktig för elsystemets normala funktion. FCR-N är alltså inte till för att hjälpa till vid olika störningar, såsom FCR-D är, utan fungerar som en förebyggande funktion med syfte att försöka undvika situationer med större störningar genom kontinuerlig reglering (Vattenfall, 2024).

Kraven för att delta i FCR-N marknaden ser liknande ut som för de båda FCR-D marknaderna men med skillnad att kunna leverera minst 1 timme av det man budade vid 100% aktivering. Även handel och prissättning sker på samma sätt som för FCR-D (Svenska kraftnät, 2024).

3.3.2.4 aFRR

aFRR (Automatic Frequency Restoration Reserve) kallad automatisk frekvensåterställningsreserv är en tjänst som aktiveras efter FCR-D och FCR-N har genomförts för att återställa frekvensen till normala nivåer. Tjänsten är automatiserad och hjälper till att finjustera balansen det sista innan man återställer frekvensen till 50 Hz. aFRR återställer alltså frekvensen medan FCR-D har gjort de tidigare stabiliseringarna. Eftersom aFRR sätts in automatiskt kan justeringarna ske på ett snabbt och effektivt sätt. (Vattenfall, 2024). Detta kräver dock en aktiveringstid på endast 5 minuter tills dess att man levererar 100%. Dessutom är kravet på budstorlek hela 1MW och uthållighetskravet ligger på en timme (Svenska kraftnät, 2024).

3.3.2.5 mFRR

mFRR (Manual Frequency Restoration Reserve), eller manuell frekvensåterställningsreserv, aktiveras, som det låter, manuellt hos SVK operatörer. Denna stödtjänst läggs in då aFRR inte räcker till för att återställa frekvensen i elnätet till den normala nivån. Tjänsten fungerar alltså som en avlastare till de automatiska stödtjänsterna (aFRR, FCR-D, FFR, FCR-N) och fyller en funktion för att hantera mer komplexa obalanser i systemet (Vattenfall, 2024) (Svenska kraftnät, 2024).

Kraven och handeln av mFRR fungerar lite annorlunda mot de automatiskt aktiverade tjänsterna. Dels är kraven på bud och aktiveringstid annorlunda, dels sker handeln av mFRR på två olika marknader istället för en. Handeln sker på både kapacitets- och den så kallade energiaktiveringsmarknaden (Svenska kraftnät, 2024).

3.3.2.6 FFR

FFR (Fast Frequency Reserve), kallad snabb frekvensreserv är till skillnad från de ovanstående tjänsterna inte till för att hjälpa till med upp- eller nedreglering av frekvensen i nätet. FFR är istället en så kallad avhjälpande åtgärd som snabbt ska kunna hantera inledningsvis stora frekvensförändringar som kan uppstå då rotationsenergin i kraftsystemet är låg (Svenska kraftnät, 2023). För att vara leverantör av FFR krävs det resurser som kan aktiveras på ett väldigt kort tidsintervall för att så snabbt som möjligt kunna hjälpa till med inbromsningen av frekvensavvikelsen (Vattenfall, 2024).

För att vara leverantör av FFR måste man ha en minsta budstrolek på 0,1 MW. Aktiveringstiden till full aktivering är uppdelad i tre alternativ. Antingen ska resursen kunna nå 100% aktivering på:

- 0,7 sekunder då aktivering sjker vid 49,5 Hz,
- 1,0 sekunder då aktiverin gsker vid 49,6 Hz,
- 1,3 sekunder om aktivering sker vid 49,7 Hz.

Uthålligheten vid 100% aktivering ska vara 30 eller 5 sekunder, men man ska vara redo att kunna återaktivera inom 15 minuter (Svenska kraftnät, 2023).

Upphandlingen av FFR sker på årsbasis och alla leverantörer måste uppfylla specifika krav (Svenska kraftnät, 2023).

3.3.2.7 Utbud på marknaderna för energilagringsreserver

För de olika kraftslagen som kan agera reserver finns olika utbud av förkvalificerad volym på marknaden. SVK publicerar kvartalsvisa uppdateringar av utbudet på marknaden för de olika kraftslagen och stödtjänster. För energilager såg den totala förkvaliciferade volymen i april 2024 för stödtjönsterna ut enligt tabell 2 nedan.

Tabell 2. Förkvalificerade volymer för energilager på marknader för reserver.

	FCR-D ned (MW)	FCR-D upp (MW)	FCR-N (MW)	aFRR (MW)	mFRR (MW)	FFR (MW)
Energilager	120	140	10	0	<30	210

Kommentar: Värdena är hämtade från SVKs hemsida och är de senast uppdaterade från april 2024 (Svenska kraftnät, 2024).

3.3.3 Leverans av stödtjänster

För att som fastighetsägare och/eller privatperson kunna vara leverantör av stödtjänster behöver man gå via en så kallad leverantör av balanstjänster eller BSP-aktör (Balancing Service Provider). Det är nödvändigt att gå via dessa aktörer eftersom SVK endast upphandlar stödtjänster från just BSP-aktörer. BSP äger inte alltid resurserna som budas in på marknaderna utan de ingår i olika avtal med resursägare, underleverantörer och så kallade aggregatorer. Aggregatorer förvaltar olika resurser för att kunna nå upp till krav på exempelvis burstorlek och således kunna leverera stödtjänster. Som privatperson/fastighetsägare måste man alltså gå via en underleverantör eller aggregator för att kunna leverera stödtjänsterna FCR, aFRR eller mFRR (Svenska kraftnät, 2024).

För att bidra med den avhjälpande tjänsten FFR behöver man inte gå via en BSP eftersom upphandlingen av FFR sker på ett annorlunda sätt och kontrakteras på årsbasis (Svenska kraftnät, 2024).

En energireserv som räcker i mindre än två timmar på aktiv maximal effekt klassas som en s.k LER-resurs (Limited Energy Reservoir). LER-resurser är resurser som har en begränsad energireserv, såsom energilager och andra liknande tekniker. Kraven för att låta en LER-resurs vara leverantör av balanstjänster är mer specifika. LER-resureser som vill delta på FCR-D upp och ned, måste reservera 20% av sin maxkapacitet för återhämtning (Svenska kraftnät, 2024). För FCR-N är siffran för reservering av återhämtning på 34% av budad kapacitet (Svenska kraftnät, 2024). Detta betyder alltså att LER-resurser inte kan lägga ett bud på den maximala kapaciteten utan måste ta hänsyn till reglering kring återhämtning för FCR.

3.4 Batterilager i fastigheter

Användning av ett batterilager i en fastighet innebär att energi kan lagras för att använda vid ett senare tillfälle. I takt med framsteg inom batteriteknologi samt en ökad medvetenhet kring energieffektivitet och förnybar energi har intresset för batterilager i byggnader ökat kraftigt.

Detta avsnitt inkluderar en teknisk bakgrund av LiB och VRFB, med en redogörelse för den underliggande teknologin i de två batterityperna. Avsnittet inkluderar också en redogörelse för skillnaden mellan långvariga energilagringssystem (Long Duration Energy Storage LDES) och kortvariga energilagringssystem (Short Duration Energy Storage, SDES) samt en sammanfattning av marknadsläget för VRFB.

3.4.1 Flödesbatterier

Flödesbatteriet är en typ av elektrokemisk energilagringsenhet, vilket innebär att den lagrar energi i kemisk form, för att sedan kunna omvandla denna till elektrisk energi och värme. Till skillnad från ett fast batteri är elektrolyterna lösta i vätskor och separeras med ett membran. Laddning och urladdning av batteriet sker genom att joner överförs mellan komponenterna genom membranet. När batteriet laddas upp tillförs elektroner och elektrolyten laddas upp. Under urladdningsfasen pumpas den flytande elektrolyten genom elektroder för att extrahera elektronerna och generera elektricitet (Dincer, 2021).

En stor fördel med flödesbatterier är att tankarna med elektrolyt är separerade från elektroderna, vilket innebär skalbarhet. Batteriets kapacitet - hur mycket energi det kan lagra, och dess effekt - hur snabbt batteriet laddas upp och ur, kan alltså justeras separat (MIT News, 2023).

Ytterligare en fördel med flödesbatteriet är möjligheten att lagra stora volymer medan en utmaning är höga kostnader för de ingående komponenterna, såsom vanadium när det gäller ett Vanadin-Redox batteri (Dincer, 2021). Elektrolyterna kan innehålla olika kemiska komponenter, men den vanligaste konstruktionen är vanadium i olika oxidationstillstånd på de två sidorna. Vanadium har en mycket låg degraderingsgrad, vilket möjliggör flödesbatteriets långa livslängd. Värt att nämna är dock att extraktion av vanadin är en komplicerad process, vilket innebär att försörjningskedjan är osäker och priserna både höga och volatila (Stauffer, 2023). Vidare är användning av flödesbatterier associerade med stora värmeförluster och verkningsgraden för ett flödesbatteri är ofta omkring 70-85 % (Huang, 2023) (Skyllas-Kazacos, 1991).

Avseende säkerhet betraktas flödesbatteriet som ett mer fördelaktigt alternativ än LiB vad gäller inomhusbruk i byggnader (Arenas, 2019). På flertal platser är litiumbatterier förbjudna för energilagring inomhus, vilket bidrar till att intresset för flödesbatterier i byggnader ökar. Elektrolyten är vanligen vattenbaserad, vilket innebär en lägre risk för termisk instabilitet och brand. (Maurice, 2024). Energidensiteten är emellertid lägre i ett flödesbatteri än i ett LiB, vilket innebär att det krävs större volymer i flödesbatteriet. Flödesbatteriet behöver därmed vara större än ett litium-jonbatteri med samma lagringskapacitet. Detta gör att flödesbatterier framförallt är lämpade för stationärt bruk (Zhan, 2014).

Trots att flödesbatteriet har tekniska fördelar har tekniken ännu inte nått massmarknaden. De flödesbatterier som är i drift är pilotanläggningar eller specialbyggda installationer. Flera företag undersöker dock möjligheten att öka sin produktion och på sikt etablera en marknad. Syftet med att installera flödesbatterier i byggnader kan vara att lagra energi under off-peak timmar, det vill säga timmar då efterfrågan på elektricitet är låg, för att sedan förse byggnaden med denna energi under perioder med hög efterfrågan. På så sätt ska byggnadsägare kunna sänka dels toppavgifter, dels avgifter för allmännyttiga behov. Installationen syftar dessutom till att sänka byggnadernas utsläpp av växthusgaser samt till att byggnaderna ska gå mer i linje med nya miljölagar (Maurice, 2024).

3.4.2 Litiumjon-batterier

I ett litiumjon-batteri (LiB) rör sig litiumjoner från den negativa elektroden till den positiva elektroden. En fördel med denna batterityp är den höga energitätheten, vilket möjliggör ett lätt och kompakt energilagringssystem. I dagsläget är litiumjon-batteriet ett populärt val som energilagringssystem för att ta vara på energi för senare användning. De har ett brett användningsområde och användningen av denna batterityp har ökat kraftigt sedan dess inträde

på marknaden under 1990-talet vilket kan förklaras av teknikens överlägsna prestanda och en betydande prisminskning (Engvall, 2021) (Uhrig, 2016).

Batterilager som uppfyller standarder och gällande regelverk anses som säkra, men vid felhantering är dessa batterier extremt brandfarliga. Termisk rusning, vilket kan initieras av bland annat överladdning, yttre värmepåverkan eller kortslutning, innebär att temperaturen ökar okontrollerat. De kemiska reaktionerna till följd av den termiska rusningen bildar värme och avger syre och cellernas elektrolyt är brännbar. Vid brand släpper batteriet också ut flera giftiga gaser. Allt sammantaget innebär detta att brandförloppet blir mycket svårhanterat av räddningspersonal och bränderna nästintill omöjliga att släcka (Elsäkerhetsverket, 2022).

3.4.3 Långvariga energilagringssystem

I takt med en ökad efterfrågan på förnybar energi har efterfrågan på långvariga energilagringssystem (Long Duration Energy Storage, LDES) ökat. LDES omfattar en grupp av konventionella och nya teknologier, vilka varierar i mognadsnivå och möjlig kommersialisering. Flödesbatterier är ett exempel på en sådan teknologi. LDES kan lagra energi i mer än 10 timmar och kan på så sätt bidra till att lösa intermittensproblem vid förnybar energiproduktion. Målsättningen är att säkerställa att förnybar energi kan lagras när den genereras och användas för att möta energibehov vid senare tillfälle. Kortvariga energilagringssystem (Short Duration Energy Storage, SDES) kan vanligen lagra energi mellan en till fyra timmar och kan på så vis stödja viss intermittens. För att möjliggöra en långsiktig användning av förnybar energiteknik behövs dock även LDES (Leyline Renewable Capital, 2024).

Wood Mackenzie är ett globalt forsknings- och konsultföretag specialiserat på energisektorn. I en rapport från 2022 sammanfattar Wood MackKenzie marknadsläget för LDES och uttrycker att det är osannolikt att utvecklare av långvariga energilagringssystem kommer att kunna skala upp kostnadseffektivt inom detta decennium. Majoriteten av de tekniker för LDES som betraktas är i vad Wood MacKenzie klassar som pilot- eller demonstrationsprojekt. Bland dessa ingår VRFB. MacKenzie menar att politikstöd, innovativa affärsmodeller samt teknologisk innovation är hörnstenar för expandering av marknaden för LDES (MacKenzie, 2022). Ett politiskt initiativ är LDES-rådet som upprättades på COP26, vars syfte är att påskynda utvecklingen av marknaden för långvarig energilagring. Rådet tillhandahåller vägledning och forskning till regeringar, nätoperatörer och stora elanvändare kring utbyggnaden av LDES (LDES Council, 2024).

LiB är ett exempel på ett SDES. Dess kommersiella mognad har drivits av företag som konkurrerat om att utveckla batterier till elfordon. Den första timmen av lagrad energi har som högst ekonomiskt värde, medan resterande timmar har ett lägre ekonomiskt värde. Detta förklaras av att den första timmen kan användas direkt för att möta ett akut energibehov. När den akuta efterfrågan är tillfredsställd minskar behovet av extra lagrad energi vilket innebär att det ekonomiska värdet på de kvarvarande timmarna är lägre. För att vara ekonomiskt lönsamt behöver VRFB alltså ha en lägre kostnad per timme än den etablerade tekniken för LiB (Leyline Renewable Capital, 2024).

3.5 Tidigare och pågående studier

I detta avsnitt sammanfattas resultat från tre tidigare och pågående studier. De två första undersöker potentialen av VRFB som energilagringssystem. Den tredje undersöker lönsamhetsstrategier för batterier i kommersiella fastigheter.

3.5.1 Dalian Flow Battery Energy Storage Peak-Shaving Power Station

I Kina genomförs ett stort energilagringsprojekt där man i september 2022 kopplade upp en lagringsstation av VRFB till elnätet i staden Dalian. Den så kallade ”Dalian Flow Battery Energy Storage Peak-shaving Power Station” har en kapacitet om 400 MWh/100 MW men planeras att utvidgas till den dubbla kapaciteten (LIU, 2022).

Med en aktuell kapacitet på 400 MWh förväntas anläggningen kunna täcka det dagliga elbehovet för 200 000 boende. Detta minskar trycket på både elnätet och kraftförsörjningen under perioder med högre effekttoppar, samtidigt som anläggningen också bidrar till en säkrare energitillförsel i den södra delen av Dalian. Tanken med projektet är således att anläggningen ska fungera som stadens ”power bank” och lagra energi när efterfrågan är låg (och ofta produktionen från förnybara källor som vind och sol är hög) och sedan frigöra denna lagrade energi under perioder av hög efterfrågan. (LIU, 2022)

Flödesbatterierna i systemet laddas under lågförbrukningstimmar av förnybara energikällor där elektrisk energi överförs till kemisk energi som lagras i batterierna. Vid högbelastningstimmar då trycket på elnätet är högt kommer energin i batterierna återigen omvandlas till elektrisk energi och distribueras ut till användare i staden. Detta projekt bidrar således även till Kinas mål kring koldioxidneutralitet och visar vägen till en mer hållbar energiförbrukning. (LIU, 2022)

Teknologin kring VRFB, vilken används i studien, anses vara lovande inom storskalig energilagring på grund av en rad faktorer som man belyser. Bland annat att nämns det att tekniken både har en god pålitlighet och säkerhet, men även att den har en lång livslängd, möjlighet att återanvända elektrolyter samt den är mer snäll mot miljön. VRFB har även en hög uteffekt och lagringskapacitet vilket är fördelaktigt för just storskalig energilagring som används i stuiden (Chinese Academy of Sciences, 2022).

3.5.2 Lithium-based vs Vanadium Redox Flow Batteries

I studien *Lithium-based vs Vandium Redox flow batteries – A comparison for Home Storage Systems* undersöks prestandan hos LiB och VRFB med hjälp av en hushållssimuleringsram. Studien framhäver att VRFB har låga variabla kostnader (kr/kWh), medan de fasta effektrelaterade kostnaderna (kr/kW) generellt sett är högre för VRFB än för LiB. En fördel med VRFB är att batteriet är mer motståndskraftigt till djupare urladdningar gentemot LiB och förväntas klara av fler cykler än ett LiB utan att batteriet förlorar kapacitet. Dessutom är verkningsgraden betydligt högre för LiB än för VRFB (Uhrig, 2016).

Studien resulterade i slutsatsen att en investering i energilagring, under givna antaganden för individuella hushåll, inte är lönsamt för någon av de utvärderade batteriteknikerna. Detta eftersom batterierna under större delen av året visat sig vara ur drift och helt urladdade. Vidare visade sig LiB vara överlägset VRFB för varje studerat hushåll. Studien betonar dock vikten av vidare forskning och utveckling för att förbättra VRFBs prestanda. Detta på grund av VRFBs låga driftkostnader, vilka framför allt vid större installeringar kan innebära konkurrenskraftighet gentemot LiB (Uhrig, 2016).

3.5.3 Analys av lönsamhetsstrategier för elnätsanslutet batteri i en kommersiell fastighet

Ett examensarbete från Uppsala universitet har undersökt olika lönsamhetsstrategier med att ansluta ett batterilager av litium-jon batterier till elnätet. Fokuset för arbetet var att undersöka

den ekonomiska lönsamheten med energilagret i en kommersiell fastighet genom att kolla på effekttoppskapning, låglastutnyttjande och anslutning till balansmarknaden (Lernstål, 2024).

Studien resulterade i att det största ekonomiska incitamentet var att delta på balansmarknaden och specifikt som leverantör av FCR-D upp. Genom att delta som leverantör av stödtjänsten FCR-D upp visade det sig att den kommersiella fastigheten skulle kunna göra stora besparingar på sina årliga utgifter. Enligt den simuleringsmodell som studien använde sig av kunde dessa besparingar uppgå mot 5,2 miljoner kr varje år från ett batterilager om 2 MW (Lernstål, 2024).

I studien framgår det att valet att endast modellera potentiella intäkter från FCR-D upp grundar sig i dels positiva resultat från tidigare studier men dels de fördelaktiga krav etablerade för att delta på marknaden. Samtidigt nämns det att kapacitetsersättningen från FCR-D upp historiskt sett har varit högre än för FCR-D ned (Lernstål, 2024).

Ett annat intressant resultat som studien påvisar är att de besparingar som kan göras separat via kapning av effekttoppar och låglastutnyttjande inte var tillräckligt stora för att investeringen i batterilagret skulle anses ekonomiskt lönsamt. Däremot poängteras att de båda områdena är innovativa och intressanta lösningar som kan bli mer aktuella i framtiden (Lernstål, 2024).

4 Fallstudie: Haga slott

I detta avsnitt presenteras resultat från fallstudien. Två investeringsalternativ utvärderas, ett för ett VRFB med lagringskapacitet 120 kWh, i- och urladdningseffekt 15 kW, och ett för ett LiB med lagringskapacitet 560 kWh, i- och urladdningskapacitet 460 kW. I tabell 3 respektive 4 presenteras egenskaper för de två studerade batterierna.

Tabell 3. Egenskaper för studerat VRFB

VRFB	
Lagringskapacitet	120 kWh
I- och urladdningseffekt	15 kW
Förväntat antal cykler	15 000
Förväntad livslängd	25 år
Årlig degradering av lagringskapacitet	0 %

Tabell 4. Egenskaper för studerat LiB

LiB	
Investeringskostnad	4 981 078 SEK
Lagringskapacitet	560 kWh
I- och urladdningseffekt	460 kW
Antal cykler	6000
Förväntad livslängd	20 år
Årlig degradering av lagringskapacitet	2 %

4.1 Investeringskostnad för VRFB

Investeringskostnaden för VRFB är inte känd. I en mailkonversation med representant från Pinflow uppskattas den initiala investeringen till 55 000-120 000 EUR samt en installationskostnad specifikt för Haga slott om 235 000 SEK (Vrána, 2024). Wood MacKenzie uppskattar kostnadsintervallet för VRFB mellan 1180-4000 USD/kW samt 255-844 USD/kWh (Colthorpe, 2022) (MacKenzie, 2022).

I tabell 5 presenteras underlag för beräkningen av investeringskostnaden för VRFB.

Tabell 5. Underlag för beräkning av investeringskostnad för VRFB

VRFB	
Installeringskostnad (Vrána, 2024)	235 000 SEK
Total kostnad (Vrána, 2024)	635 450 – 1 392 000 SEK*
Kostnad per installerad i- och urladdningskapacitet (MacKenzie, 2022)	12 800 - 43 320 SEK/kW**
Kostnad per installerad lagringskapacitet (MacKenzie, 2022)	3195 – 9150 SEK/kWh**

*Beräknat på växelkursen 1 EUR = 11,6 SEK
**Beräknat på växelkursen 1 USD = 10,8 SEK

Tabell 6. Investeringskostnad för VRFB baserat på Wood MacKenzies marknadsanalys för LDES.

	Fall 1 (lågt räknat)	Fall 2 (högt räknat)
Installeringskostnad	235 000 SEK	235 000 SEK
Kostnad för installerad lagringskapacitet, 120 kWh	383 400 SEK	1 098 000 SEK
Kostnad för installerad i- och urladdningskapacitet, 15 kW	192 000 SEK	649 800 SEK
Totalt investering:	**810 400 SEK**	**1 982 800 SEK**

I tabell 6 redovisas en uppskattad initial investering baserat på Wood MacKenzies uppskattning av kostnader för installerad lagringskapacitet och installerad i- och urladdningskapacitet hos VRFB (MacKenzie, 2022). Kostnad för installation baseras däremot på information från Pinflow (Vrána, 2024). I tabellen redovisas två fall. Fall 1 är lågt räknat och fall 2 är högt räknat. Fall 1 visar en total investering om ungefär 810 tkr, medan fall 2 visar en total investering om ca 1,98 mkr. I fall 2 beräknas alltså investeringen uppgå i cirka 2,5 gånger investeringen i fall 1.

Tabell 7: Investeringskostnad för VRFB baserat på uppskattning från Pinflow

	Fall 1 (lågt räknat)	**Fall 2 (högt räknat)**
Installeringskostnad	235 000 SEK	235 000 SEK
Kostnad för 120 KWh lagringskapacitet, 15 kW i- och urladdningskapacitet	635 450	1 392 000 SEK
Totalt investering:	**870 450 SEK**	**1 627 000 SEK**

I tabell 7 redovisas en uppskattning av den initiala investeringskostnaden, baserat på information från Pinflow (Vrána, 2024). Även för denna beräkning redovsisas två fall, där fall 1 är lågt räknat och fall 2 högt räknat. För fall 1 beräknas investeringen uppgå i 870 tkr och för fall 2 beräknas investeringen uppgå i 1,63 mkr. I fall 2 beräknas investeringen alltså uppgå i cirka 2 gånger investeringen i fall 1.

4.2 Intäkter från deltagande på marknaden för FCR-D ned och FCR-D upp

I denna del av undersökningen beräknas potentiella intäktsströmmar från deltagandet på marknaden för FCR-D ned och FCR-D upp för de två alternativen. FCR-D upp och ned betraktas specifikt på grund av att volymbehovet för dessa stödjänster är högt från SVKs sida, resultat från tidigare studier, samt att villkoren för att delta på dessa marknader betraktas som fördelaktiga.

Som underlag till beräkningen hämtas historisk timdata över marginalpriser på avropad kapacitet för produkterna FCR-D upp och FCR-D ned från Svenska kraftnäts mimer.se. Beräkningarna tar hänsyn till ett antagande för avgiften till aggregator och BSP som redovisas i tabell 8, och degradering för LiB som redovisas i tabell 4. Beräkningen tar också hänsyn till det faktum att LiB klassas som en LER-resurs och att resursen därmed behöver reservera 20% av sin maxkapacitet för återhämtning.

Tabell 8. Avgift till aggregator och BSP.

Batteri	**Avgift till aggregator och BSP (%)**
VRFB	30
LiB	30

På grund av osäkerheter kopplad till prisutveckling på balansmarknaden utförs beräkningar på intäkter i fem olika scenarier, där priser på avropad kapacitet beräknas stanna vid 2023 års nivå samt öka respektive minska med 5 och 10 procent.

I tabell 9 och tabell 10 nedan redovisas resultatet av beräkningar över förväntade intäkter från balansmarknaden. Fem olika fall undersöks där den årliga förändringen av marginalpriset på avropad kapacitet varierar mellan -10 % till + 10 %.

Tabell 9. Intäktsströmmar från balansmarknaden för VRFB.

Intäkter från balansmarknaden för VRFB (SEK)					
Årlig prisförändring på FCR-D	**-10 %**	**-5 %**	**0 %**	**+ 5 %**	**+ 10 %**
År 1	70 844	74 780	78 716	82 652	86 588
År 2	63 760	71 041	78 716	86 785	95 247
År 3	57 384	67 489	78 716	91 124	104 771
År 4	51 645	64 114	78 716	95 680	115 248
År 5	46 481	60 909	78 716	100 464	126 773
År 6	41 833	57 863	78 716	105 487	139 450
År 7	37 650	54 970	78 716	110 762	153 396
År 8	33 885	52 221	78 716	116 300	168 735
År 9	30 496	49 610	78 716	122 115	185 609
År 10	27 447	47 130	78 716	128 220	204 170
Ackumulerat	461 426	600 132	787 162	1 039 588	1 379 986

Som framgår av tabell 9 ovan beräknas ackumulerade intäkter från balansmarknaden för ett VRFB om 120 kWh/15 kW variera mellan ca 460 000 kr och 1 380 000 kr på en tioårsperiod. I det förstnämnda fallet beräknas en årlig minskning av marginalpriserna på -10 % och i det sistnämnda fallet beräknas en årlig ökning av marginalpriserna på + 10 %.

Tabell 10. Intäktsströmmar från balansmarknaden för LiB.

Intäkter från balansmarknaden för LiB (SEK)					
Årlig prisförändring på FCR-D	**-10 %**	**-5 %**	**0 %**	**+ 5 %**	**+ 10 %**
År 1	1 738 053	1 834 611	1 931 179	2 027 728	2 124 287
År 2	1 532 962	1 708 023	1 892 546	2 086 532	2 289 981
År 3	1 353 072	1 590 169	1 854 695	2 147 042	2 468 599
År 4	1 192 528	1 480 448	1 817 601	2 209 306	2 661 150
År 5	1 051 810	1 378 297	1 781 249	2 273 376	2 868 720
År 6	927 696	1 283 194	1 745 624	2 339 303	3 092 480
År 7	818 228	1 194 654	1 710 712	2 407 143	3 333 694
År 8	721 677	1 112 223	1 676 498	2 476 950	3 593 722
År 9	636 519	1 035 479	1 642 968	2 548 782	3 874 032
År 10	561 410	964 031	1 610 108	2 622 697	4 176 206
Ackumulerat	10 532 957	13 581 130	17 663 172	23 138 860	30 482 870

Av tabell 10 framgår att intäktsströmmarna för ett LiB-lager om 560 kWh/460 kW, under en tioårs-period är betydligt högre än de som presenterats för VRFB i tabell 9. De ackumulerade intäkterna för LiB-lagret efter tio år beräknas variera mellan ca 10,5 mkr till 30,5 mkr för LiB.

4.3 Nettonuvärdeanalys

I tabell 11 och tabell 12 presenteras resultat från en nettonuvärdesanalys av investeringsalternativen. En diskonteringsränta om 11,1 % används. Denna baseras på en siffra på viktad kapitalkostnad (WACC, Weighted average cost of capital) hämtad från Scandics årsrapport från 2023 (Scandic, 2023). Denna uppgår i 14 %, och multipliceras med bolagsskatten för Sverige. Skattesatsen 20,6 % används (Sweden.se, 2024).

Tabell 11. Nettonuvärde för VRFB, Analys av hur investeringsnivå och årlig prisförändring på FCR-D ned och upp påverkar nettonuvärdet för VRFB.

Nettonuvärden för VRFB (SEK)					
Årlig prisförändring på FCR-D:	**Investeringsnivå 1 (850 000 SEK)**	**Investeringsnivå 2 (1 050 000 SEK)**	**Investeringsnivå 3 (1 250 000 SEK)**	**Investeringsnivå 4 (1 450 000 SEK)**	**Investeringsnivå 5 (1 650 000 SEK)**
-10%	-555 270	-755 270	-955 270	-1 155 270	-1 355 270
-5%	-482 815	-682 815	-882 814	-1 082 815	-1 282 815
0%	-388 669	-588 669	-788 669	-988 669	-1 188 669
5%	-265 802	-465 802	-665 802	-865 802	-1 065 802
10%	-105 037	-305 037	-505 037	-705 037	-905 037

I tabell 11 redovisas nettonuvärdet för VRFB. Tabellen är utformad som en känslighetsanalys, där påverkan på av initial investeringskostnad samt nivåer på kassaflödet, här inkomster från balansmarknaden, redovisas. Resulatet spannar från det mest optimala läget då intäkterna från frekvensreglering ökat med 10% per år och investeringskostnaden är på den lägsta nivån, till det minst optimala läget där intäkterna minskat med 10% per år och investeringskostnaden ligger på den högsta nivån. Intäktströmmar från frekvensreglering presenteras i tabell 9. Intervallet för initial investeringskostnad för VRFB väljs till 850 tkr till 1,65 mkr, vilket baseras på beräkningen i tabell 7. För VRFB spannar nettonuvärdet således mellan ungefär -105 000 kr till – 1,36 mkr.

Tabell 12. Nettonuvärdet för LiB. Analys av hur prisförändringar på FCR-D ned och upp påverkar nettonuvärdet för LiB.

Nettonuvärden för LiB	
Årlig prisförändring:	**Investering: 4 981 078 SEK**
-10%	1 845 670
-5%	3 465 887
0%	5 549 798
+5%	8 250 961
+10%	11 763 313

I tabell 12 redovisas nettonuvärdet för LiB. Även denna tabell är utformad som en känslighetsanalys. För LiB är den initiala investeringen känd och därför undersöks enbart kassaflödet, det vill säga inkomsterna från balansmarknadens påverkan på nettonuvärdet. Intäktströmmar från frekvensreglering presenteras i tabell 10. För LiB är samtliga nettonuvärden positiva och varierar mellan ca 1,8 mkr till 11,7 mkr. Nettonuvärdet visar sig alltså vara negativt för samtliga utfall för VRFB, och positivt för samtliga utfall för LiB.

4.4 Återbetalningstid

I tabell 13 och tabell 14 redovisas payback-tid, också återbetalningstid, för de två investeringsalternativen.

Tabell 13. Payback-tid för VRFB. Analys av hur investeringsnivå och prisförändringar på FCR-D ned och upp påverkar återbetalningstiden.

Årlig prisförändring på FCR-D	Payback-tid för VRFB				
	Investeringsnivå 1 850 000	**Investeringsnivå 2 1 050 000**	**Investeringsnivå 3 1 250 000**	**Investeringsnivå 4 1 450 000**	**Investeringsnivå 5 1 650 000**
-10 %	18	23	27	31	36
-5 %	14	17	21	24	27
0 %	11	13	16	18	21
+5 %	8	10	12	14	16
+10 %	6	8	9	11	12

Tabell 13 visar payback-tiden för VRFB. Även detta resultat är utformat som en känslighetsanalys där påverkan av investeringsnivå och prisförändringar på FCR-D ned och upp på återbetalningstiden undersöks. Liksom i känslighetsanalysen för nettonuvärdet används ett intervall för investeringskostnaden på 850 000 – 1 450 000 SEK, baserat på beräkningen i tabell 7. Olika utfall för intäktsströmmar presenteras i tabell 9. I tabell 13 ses alla typer av fall mellan intäkter och investering där det mest optimala fallet ger en payback-tid på 6 år och det minst optimala fallet på 36 år. De övriga fallen hamnar alltså i spannet 6 till 36 år.

Tabell 14. Payback-tid för LiB. Analys av hur investeringsnivå och prisförändringar på FCR-D ned och upp påverkar återbetalningstiden.

Årlig förändring i intäkter från balansmarknaden	Payback-tid för LiB
- 10 %	4,7
- 5 %	3,7
0 %	2,8
+ 5 %	2,1
+ 10 %	1,6

I tabell 14 redovisas payback-tiden för LiB. För LiB är den initiala investeringen känd och återbetalningstiden varierar alltså här endast med intäkter från balansmarknaden, vilket innebär att utfallen blir färre än för VRFB. För LiB varierar payback-tiden mellan 1,6-4,7 år, där den lägsta siffran representerar då intäkterna ökat med 10% per år, och den högsta siffran motsvarar då intäkterna minskat med 10% per år. Resultatet från tabell 14 visar att återbetalningstiden för LiB är lägre i alla fall än de för VRFB, vilka presenteras i tabell 13.

4.5 Kostnader per kWh och cykel

Antalet cykler skiljer sig markant åt mellan de två batteriteknologierna och av denna anledning utförs en beräkning av kostnader per kWh och cykel. Dessa redovisas i tabell 15 och tabell 16.

Tabell 15. Kostnad per kWh och cykel VRFB.

Kostnad per kWh och cykel för VRFB	
Investering	**SEK/(kWh*Cykel)**
Investeringsnivå 1: 850 000	0,47
Investeringsnivå 2: 1 050 000	0,58
Investeringsnivå 3: 1 250 000	0,69
Investeringsnivå 4: 1 450 000	0,81
Investeringsnivå 5: 1 650 000	0,92

Kommentar: Beräknat med antalet 15 000 cykler.

Tabell 15 visar kostnaden per kWh och cykel för VRFB. VRFB från Pinflow förväntas klara av 15 000 cykler. Investeringskostnaden är dock inte känd och därför utformas resultatet som en känslighetsanalys där osäkerheter kring initial investering tas hänsyn till. Även för denna beräkning antas investeringen för VRFB uppgå i mellan 850 tkr kr och 1,65 mkr, vilket baseras på beräkningen i tabell 7. Av tabell 15 framgår att kostnaden per kWh och cykel beräknas

variera mellan mellan 0,47-0,92 kr/(kWh*cykel), där det lägsta värdet motsvarar en investeringskostnad på 850 tkr och det högsta en investeringskostnad på 1, 65 mkr.

Tabell 16. Kostnad per kWh och cykel LiB.

Kostnad per kWh och cykel för LiB	
Antal cykler	**SEK/(kWh*Cykel)**
6000	1,5
5000	1,8
4000	2,2
3000	3

Kommentar: Beräknat med en fast investeringskostnad om 4 981 078.

Tabell 16 visar kostnader per kWh och cykel för LiB. Resulteten från tabell 16 visar på högre kostnader per kWh och cykel för LiB-lagret än för det resultat som ses i tabell 15 för VRFB. Att undersökningen tar hänsyn till olika antal cykler för LiB baseras på resultat från tidigare studier, som framhävt att LiB har större benägenhet att förlora kapacitet än VRFB (Uhrig, 2016). Känslighetsanalysen tar hänsyn till ett intervall av 3000-6000 cykler för LiB. Resultatet blir mellan 1,5-3 kr/(kWh*cykel) för LiB, där det lägsta värdet motsvarar 6000 cykler, och det högsta värdet 3000 cykler.

5 Diskussion

5.1 Ekonomisk diskussion

Vid bedömningen av investeringskostnaden för ett VRFB på Haga slott har två olika informationskällor använts, vilka redovisas i tabell 6 respektive tabell 7. I tabell 6 redovisas beräkningar utifrån antaganden kring kostnader per installerad kWh och kW, enligt Wood MacKenzies marknadsanalys för LDES. Med dessa antaganden beräknas den initiala investeringskostnaden för VRFB på Haga slott uppgå i mellan 810 tkr och 1,98 mkr. Baserat på mailkonversation med representant från Pinflow beräknas investeringskostnaden till mellan 870 tkr och 1,63 mkr, vilket redovisas i tabell 7. På grund av avsaknad av information kring kostnad per kW respektive kWh ingår ingen uppdelning av total kostnad per kW och kWh i tabell 7. Resultatet visar att investeringskostnaden för ett VRFB är förknippad med en del osäkerheter. Detta skulle kunna förklaras av att marknaden för VRFB är liten och i ett tidigt stadie. Priserna på vanadium är både höga och volatila, vilket kan tänkas försvåra möjligheten att göra VRFB till en mer konventionell teknologi. Att LiB är en mer beprövad teknologi kan också tänkas innebära att kostnader för service och underhåll är enklare att förutspå, vilket är en aspekt som bör vägas in i ett investeringsbeslut.

Utifrån Lernståls studie *Analys av lönsamhetstrategier för elnätsanslutet batterilager i en kommersiell fastighet*, verkar det som att de besparingar som går att göra med effekttoppskapning med hjälp av ett batterilager är relativt små. Det är således inte i möjligheten till att kapa effekttoppar som några ekonomiska incitament till att investera i ett batterilager finns. Det kommer alltså inte vara dessa besparingar som motiverar eller driver ett incitament

till att investera i varken ett VRFB eller lager av LiB. Dock visar både resultat från fallstudien och Lernståls studie att ett ekonomiskt incitament till investering i batterier finns i att delta som leverantör av stödtjänster på balansmarknaden. Tabell 9 och 10 visar intäktströmmar för både VRFB och LiB från kapacitetsersättning från att leverera stödtjänsterna FCR-D upp och ned på SVKs balansmarknad.

Det är dock i detta fall viktigt att notera att utvecklingen av balansmarknaden är svår att förutspå och att det därför finns en viss osäkerhet i resultaten i tabell 9 och 10. Även om SVK förutspår en ökad efterfrågan av frekvensreglering, något som skulle kunna innebära en prisökning på stödtjänsterna, är det troligt att installationsakten av olika lösningar som kan agera leverantör av stödtjänster samtidigt ökar. Således blir det svårt att säga hur priserna för kapacitetsersättnigng kommer att ändras i framtiden eftersom både utbud och efterfrågan kan komma att öka. Det finns även en risk att marknaden längre fram i tiden blir mättad, om fler vill leverera stödtjänster än vad SVK frågar efter. Detta skulle isåfall skapa ett utbudsöverskott vilket skulle kunna resultera i minskade priser för kapacitetsersättning. Det är alltså svårt att avgöra hur marknaden för frekvensreglering kommer att utvecklas.

För att ta hänsyn osäkerheten analyserades fem olika fall för de potentiella intäktsströmmarna för VRFB och LiB där kapacitesersättnignen antingen antas öka, minska eller förbli densamma. Vilket scenario från tabell 9 och 10 som är det mest troliga är, även det, svårt att avgöra, men med tanke på Sveriges ambitiösa klimatmål, utfasningen av koldioxid och en ökad andel förnybara energikällor kommer troligen priserna för stödtjänster att gå upp. Detta då en energimix med hög andel förnybart även resulterar i mer osäker produktion, vilket kommer öka behovet på frekvensreglering i elsystemet då oförutsägbara händelser i produktionen blir vanligare.

Att effekttoppskapning inte blir ekonomiskt lönsamt grundar sig i att den effekt som kan kapas av från topparna under timmar med hög elanvändning i en fastighet inte genererar en betydande besparing. För Haga slott innebär det att även om de kan minska kostnaderna under timmar med hög förbrukning är det inte där den stora skillnaden i besparingen ligger. Det är däremot möjligt att batteriet skulle kunna hjälpa till att kapa effekttopparna så pass mycket att Haga slott tar ner sin säkring och alltså byter elavtal. Det handlar i sådant fall om att ändra på elnätsavtalets fasta avgift, som representerar säkringsstorleken, till en mindre säkring. Detta i kombination med att ha ett elhandelsavtal som är rörligt och använda sig av ett batteri som stödjer upp vi höga elpriser och eller dämpar effekttopparna skulle möjligen kunna generera mer besparingar än endast effekttoppskapning. Det är däremot svårt att säga eftersom denna studie inte fokuserat på beräkningar av effekttoppskapning eller analyserat byte av elnätsavtal. Det är något som hade varit intressant att undersöka i en vidare studie.

Ackumulerade intäktsströmmarna under 10 år från FCR-D upp och ned varierar som konstaterat i resultatet för VRFB mellan ungefär 460 000 kr och 1,38 mkr, medan de för LiB varierar mellan ca 10,5 mkr och 30,5 mkr. Det är tydligt att intäkterna som fås in för LiB är betydligt högre än de för VRFB. Dock är detta ett förväntat resultat eftersom det LiB som undersökts har en högre effekt än VRFB och således genererar mer intäkter från deltagandet på balansmarknaden. Detta trots antagandet om att LiB klassas som en LER-resus medan VRFB inte gör det. Dessa antaganden grundar sig i litteraturgranskningen där det går att läsa att en LER-resurs är reserver med begränsad energireserv som klarar av mindre än två timmar på maximal effekt. Eftersom att LiB har en installerad effekt om 460 kW och energilagring om 560 kWh, går det enkelt att se att batteriet inte klarar mer än två timmar på aktiverad maximal effekt. Således bedömdes LiB som en LER-resurs medan VRFB som har 120 kWh och 15 kW räcker betydligt längre än

två timmar och således inte bedöms som en LER-resurs. Det innebär att 20% av effekten som LiB batteriet kan leverera måste reserveras för återhämtning och på så sätt blir den totala effekten som kan budas till FCR-D upp och ned 20% mindre än maxeffekt för LiB. För VRFB finns inte några sådana restriktioner.

Förutom att 20% dragits bort från den effekt LiB batteriet kan buda på till frekvensmarknaden, har även hänsyn tagits till en årlig degradering på 2% för LiB, medan ingen degradering antagits för VRFB. Detta har gjort att effekten som kan budas från LiB minskat varje år i beräkningen medan den förblivit densamma för VRFB. Trots detta kan det som noterat i tabell 9 och 10 ses att intäkterna fortfarande förblir högre för LiB än VRFB. Dock är detta sett ur en tio-års period och efter ett tag skulle degraderingen av LiB göra att de inte går att generera lika mycket intäkter längre. Vid denna tidpunkt hade nog dessutom LiB-lagret behövts återvinnas och en ny investering göras. Det är dock osäkert när detta skulle ske och hur VRFBt skulle stå sig i jämförelse.

Det som är även intressant att diskutera är hur intäktströmmarna hade förändrats om de även beräknats på någon eller några av de andra stödtjänsterna som SVK erbjuder. I tabell 2 från bakgrunden ses det hur utbudet på marknaden av de olika stödtjänsterna ser ut för energilager. Där framgår det att finns lite eller inget utbud alls av FCR-N, aFRR och MFRR för energilager. Således är det rimligt att anta att det inte går att generera speciellt mycket intäkter från att agera leverantör av dessa tjänster i nuläget för batterilager. Det är med anledning till detta samt att vissa av kraven för FCR-N, aFRR och mFRR är annorlunda och något högre än de för FCR-D som dessa stödtjänster inte tas med i beräkningen av intäktsströmmar. Den största anledningen är dock kopplat till utbudet och att det inte är så stort hos dessa stödtjänster för energilager.

Däremot går det att konstatera från tabell 2 att utbudet av FFR är högre än för både FCR-D upp och ned. Alltså finns det god potential att delta på marknaden för FFR som leverantör och därmed generera mer intäkter. Men, om man ser FCR-D upp och ned som en gemensam stödtjänst, alltså endast FCR-D, har de totalt högre utbud än FFR. Således är det ändå rimligt att studien endast grundat sig i beräkningar av intäkter från FCR-D upp och ned. Detta beslut grundar sig dessutom även i litteraturgranskningen där det går att läsa att upphandlingen av FFR inte görs på samma sätt som för FCR-D. Eftersom FFR handlas direkt med SVK (ej via en BSP) och ett avtal på ett år bestäms, är det troligtvis svårt för en enskild privat aktör att bidra med FFR i nuläget.

Utifrån litteraturgranskningen och de resultat som fallstudien genererat är det relativt tydligt att en investering i ett VRFB för kommersiella fastigheter inte är ekonomiskt försvarbart. Det är flera resultat från fallstudien som pekar på detta i kombination med resultatet från en tidigare studie.

Först och främst ses negativa resultat från nettonuvärdesmetoden för alla fall när det gäller VRFB. I tabell 11 ses att inte ens det mest optimala fallet då intäkterna väntas öka med 10% per år och investeringskostnaden är på den lägsta uppskattade nivån om (ca 850 000 kr) fås ett positivt nettonuvärde. Detta resultat tyder på att det inte är värt att investera i ett VRFB för Haga slott oavsett investeringsnivå eller förväntad utveckling av balansmarknaden. Detta resultat går att ytterligare bekräfta från tabell 13 där en känslighetsanalys av payback-tiden gjorts för VRFB. I tabell 12 presenteras en payback-tid för det VRFB som är tänkt att installeras på Haga slott att ligga mellan 6 – 36 år. Även om 6 år i detta fall kan verka relativt lite bekräftar nettonuvärdesanalysen att det inte är en investering väl värd att göra. Att det dessutom skulle

hamna på 6 år är kanske inte det mest trovärdiga eftersom detta är ett ”best case scenario”, både sätt till låga investeringskostnader och utvecklingen av balansmarknaden.

Jämförs nettonuvärden och payback-tid för VRFB med LiB är resultatet tydligt. För LiB är alla nettonuvärden för olika prisscenrion positiva (som ses i tabell 12), vilket indikerar på att investeringen är värd att göra oavsett marknadsutvecklingen av stödtjänster. Vidare ligger payback-tiden för LiB på ca 2 – 5 år, vilket kan ses i tabell 14. Detta betyder att det rent ekonomiskt sätt kommer vara lönsamt att investera i ett LiB-lager. Dock är det värt att diskutera två aspekter gällande nettonuvärdes analysen som påverkar dess trovärdighet.

Den första diskussionsaspekten för nettonuvärdesanalysen är diskonteringsräntan som används för att beräkna nettonuvärdena. Diskonteringsräntan kommer, som nämnt i metoden, från Scandic Hotels års- och hållbarhetsrapport. Eftersom att Scandic, likt Haga slott, är en hotellverksamhet bör båda vekrsamheter ha avkastningskrav nära varandra. Eftersom att det inte gick att tillgå Haga slotts årsredovisning var det svårt att fastställa den faktiska diskonteringsräntan men, den från Scandic anses tillräckligt bra. Dock finns det självklart brister och saker som skiljer de två hotellverksamheterna åt som gör att antagandet kring diskonteringsräntan kan vara bristfällig. Exemeplvis är Scandic en stor hotellkedja med många hotell utspridda över hela Norden, medan Haga slott är mer begränsade till fåtal fastigheter och hotell i Sverige.

Den andra diskussionspunkten kring nettonuvärdesanalysen är att den är baserad på intäktsflöden som inte tar hänsyn till några kostnader. Enligt formeln för nettonuvärde ska det vara kassaflöden för en viss tidsperiod som ska beaktas och således bör både intäkter och kostnader tas i beaktning. Eftersom att VRFBs underhållskostnader och övriga kostnader är osäkra har dessa uteslutits helt i beräkninen av nettonuvärdet. För att få jämförbara resultat uteslöts även dessa kostnader för LiB. Således tar nettonuvärdesanalysen endast hänsyn till intäktsströmmar under en tioårsperiod. Det gör självklart att analysen kanske inte helt och hållet stämmer och det är möjligt att det för LiB skulle innebära att någon av nettonuvärderna blir negativ. Det är dock svårt att avgöra men för VRFB spelar det inte någon större roll för resultatet eftersom alla nettonuvärden redan är negativa utan hänsyn till övriga kostnader.

5.2 Teknisk diskussion

Från litteraturstudien framgår att en stor fördel med VRFB är dess skalbarhet, vilket innebär att energilagring och laddningseffekt kan hanteras separat. Att lagringskapaciteten kan öka eller minska utan att laddningseffekten behöver skalas upp eller ned och vice versa, skiljer sig från ett LiB där dessa komponenter är tätare sammankopplade och inte kan justeras i efterhand. I fallstudien undersöks ett VRFB och ett LiB där förhållandet mellan energilagring och laddningskapacitet är betydligt större för VRFB än för LiB (120 kWh/15 kW respektive 560 kWh/460 kW). När det gäller fastigheter som vill delta som leverantör av stödtjänster på SVKs marknader, kan man argumentera för att en hög energilagringskapacitet i förhållande till laddningseffekt är positivt. Detta möjliggör att batteriet inte behöver klassas som en LER-resurs och hela den installerade kapaciteten kan därmed budas ut. En hög energilagringskapacitet kan också tänkas vara positivt om Haga slott vill använda batteriet som energireserv vid exempelvis strömavbrott, då detta innebär möjlighet till längre perioder av självförsörjning.

Ytterligare en viktig fördel med VRFB visar sig vara den långa livslängden samt att detta batteri inte är lika känsligt för djup urladdning och temperaturförhållanden som ett LiB. Detta innebär VRFB inte har lika stor benägenhet att förlora kapacitet som ett LiB. Det är på så vis också

möjligt att argumentera för VRFB ur en hållbarhetssynpunkt, då ett VRFB möjligen inte behöver bytas ut lika ofta som ett LiB. Dessutom kan LiB vid felhantering vara extremt brandfarliga och VRFB betraktas av många som ett säkrare alternativ för tillämpning i byggnader.

Antalet cykler som de betraktade batterierna antas klara av skiljer sig åt. Därför undersöks kostnad per kWh per cykel för de två investeringsalternativen för Haga slott. Ett VRFB från Pinflow antas klara av 15 000 cykler, medan ett LiB från Polarium antas klara av 6000 cykler. I tabell 15 visas att kostnaden per kWh och cykel för VRFB är 0,47-0,92 SEK/kWh/cykel. Tabell 16 visar motsvarande värden för LiB, med kostnad per kWh och cykel mellan 1,5-3,3 SEK/kWh/cykel, där det lägsta värdet motsvarar 3000 cykler medan det högsta värdet motsvarar 6000 cykler. Resultatet från fallstudien av Haga slott stämmer därmed överens med resultatet från litteraturgranskningen, som visat att VRFB har låga variabla kostnader (SEK/kWh).

LDES-teknologier, inklusive flödesbatterier, betraktas som viktiga för omställningen till ett förnybart energisystem. Detta på grund av dess potential att lösa problem med intermittens till följd av osäkerhet vid produktion med förnybara energikällor. Energilagringssystem behöver kunna lagra energi under långa perioder när produktionen av förnybar energi är låg. Flödesbatteriet betraktas som en lovande teknik för detta, vilket bidrar till att forskning på flödesbatterier är intressant och högst aktuell. Det främsta exemplet på ett forskningsprojekt där potentialen av flödesbatterier för långvarig energilagring undersöks är projektet i Dalian, där anläggningen med flödesbatterier beräknas kunna bemöta elbehovet för ett stort antal boende i staden. Denna studie visar på möjligheterna med flödesbatterier för storskalig energilagring.

Som framgår av resultatet från fallstudien av Haga slott är det enklare att argumentera för en investering i ett LiB. LiB är en väl etablerad teknologi för energilagring och den mest förekommande batteriteknologin i fastigheter. VRFB som energilagringssystem är inte vanligt förekommande, och det finns få exempel på tidigare installationer i fastigheter. De installationer som finns är pilotprojekt eller testanläggningar. Investeringskostnader för VRFB är både höga och osäkra och för att VRFB ska kunna mäta sig med LiB behöver dessa kostnader minska.

Vidare är energitätheten lägre i ett VRFB än i ett LiB, vilket innebär att VRFB kommer att ta större plats. För enskilda fastigheter som Haga slott är det kan tänkas att det värderas högt att anläggningen inte tar allt för stor plats, vilket innebär att man skulle kunna argumentera för ett LiB även ur denna synpunkt. Dessutom har VRFB generellt sett än lägre verkningsgrad, vilket leder till större värmeförluster. Denna studie har avgränsats till att inte undersöka värmeåtervinningssystem. Detta kan dock vara ett intressant område för framtida forskning.

6 Slutsatser

Undersökningen resulterade i slutsatsen att de potentiella intäktsströmmarna och kostnadsbesparingar som en fastighetsägare kan erhålla genom att investera i ett batterilager är intäkter från att delta som leverantör av stödjänster hos SVK, försäljning av el samt kostnasdsbesparing genom kapning av effekttoppar. Intäkter från SVKs balansmarknad är dock det största ekonomiska incitamentet. Försäljning av av el respektive kostnadsbesparingar från kapning av effekttoppar utgör ett betydligt mindre ekonomiskt incitament.

Fallstudien av Haga slott visade att en investering i ett VRFB om 120 kWh lagringskapacitet och 15 kW i- och urladdningskapacitet inte är lönsam, baserat på resultatet från en analys av nettonuvärdet. I undersökningen av nettonuvärdet inkluderas en känslighetsanalys där investeringsnivån 850 tkr-1,65 mkr, samt olika fall för kapacitetsersättning från SVK inkluderas. Nettonuvärdet visar sig vara negativt för samtliga fall. En investering i ett LiB om 560 kWh lagringskapacitet, 460 kW i- och urladdningskapacitet visar sig dock vara lönsam för samtliga fall av prisförändringar på balansmarknaden. En rekommendation till Haga slott skulle därmed vara att avstå från investeringen i ett VRFB, men att att överväga investeringen i ett LiB. Vad gäller återbetalningstiden beräknas denna uppgå i cirka 2 år för LiB, och mellan 6 och 36 år för VRFB, beroende på initial investeringskostnad samt förändringar i kapacitetsersättning. De rörliga kostnaderna (SEK/kWh/cykel) visar sig vara lägre för VRFB än för LiB.

Vad gäller tekniska och ekonomiska hinder och drivkrafter för VRFB i fastighetsbranschen visar litteraturstudien att en stor fördel med ett flödesbatteri är dess skalbarhet, där energilagringskapacitet och i- och urladdningseffekt är särkopplade. VRFB är också mer motståndskraftig för djup urladdning och inte lika känslig för temperaturförhållanden som ett LiB. Livslängden för ett VFRB är generellt sett lång och batteriet klarar av många cykler. Detta bidrar till att man kan argumentera för VRFB ur en hållbarhetssynpunkt. Ett hinder för att VRFB ska bli en mer etablerad teknologi i fastigheter är de höga effektrelaterade investeringskostnaderna (SEK/kW). De rörliga kostnaderna (SEK/kWh) för ett VRFB är dock fördelaktiga gentemot de för ett LiB. Energitätheten är dock låg i ett VRFB vilket innebär att anläggningarna tar stor plats i förhållande till de för LiB. Vidare är verkningsgraden för ett VRFB lägre än för ett LiB, vilket innebär att VRFB har större värmeförluster. Ytterligare en drivkraft för att expandera VRFB i fastighetsbranschen är säkerhetsaspekten, där utnyttjandet av LiB är förknippade med en större brandrisk till följd av termisk rusning.

VRFB ingår i kategorin långvariga energilagringssystem (LDES) vilket betraktas som ett viktigt forskningsområde för att lösa problem med intermittens i energisystemet. Litteraturgranskningen framhäver att VRFB är speciellt intressant när det gäller storskalig energilagring. På sikt är det möjligt att politiska initiativ och investeringar bidrar till en förbättring av teknologin samt minskade initiala investeringskostnader för VRFB, vilket skulle möjliggöra en utökning av marknaden för VRFB.

Sammanfattningsvis betraktas flödesbatterier som en intressant teknologi för framtida energilagring, men kan i dagsläget inte mäta sig med LiB för tillämpning i fastigheter. Vikten av framtida forskning på LDES och VRFB är dock tydlig. På sikt är det möjligt att detta bidrar till att VRFB blir en mer etablerad teknologi och att de initiala kostnaderna för investering minskar, vilket skulle kunna göra VRFB mer attraktivt för en fastighetsägare som Haga slott. Dessutom visar sig fortsatt forskning och utveckling av VRFB kunna stödja övergången till ett förnybart och mer hållbart energisystem. På så sätt kan utvecklingen av VRFB även bidra till FNs globala hållbarhetsmål, särskilt mål 7 och 9.

7 Referenser

Arenas, L. F. (Augusti 2019). Redox flow batteries for energy storage: their promise, achievements and challenges. *Current Opinion in Electrochemistry*, ss. 117-126.

Chinese Academy of Sciences. (den 29 september 2022). *World's Largest Flow Battery Energy Storage Station Connected to Grid*. Hämtat från CAS - webbplats: https://english.cas.cn/newsroom/research_news/chem/202205/t20220531_306054.shtml

Colthorpe, A. (den 8 december 2022). Wood Mackenzie: Investment pours in for long-duration energy storage, but scale remains challenge. *Energy Storage News*.

Dennerstedt, M. (den 25 april 2024). Intern mailkonversation med representant från Haga slott.

Dincer, I. o. (2021). Fundamentals and Concepts. i *Heat Storage Systems for Buildings*. Elsevier.

Elsäkerhetsverket. (den 23 november 2022). *Säkerhetsrisker med batterilager*. Hämtat från Elsäkerhetsverket - webbplats: https://www.elsakerhetsverket.se/privatpersoner/din-elanlaggning/bygga-och-renovera/installation-av-batterilager/sakerhetsrisker-med-batterilager/

Energimarknadsinspektionen. (den 3 mars 2021). *Elhandelsavtal*. Hämtat från Ei - webbplats: https://ei.se/konsument/el/elavtal/elhandelsavtal

Engvall, V. (den 5 oktober 2021). Litiumjonbatterier i byggnader - En ny risk inom byggnader. *Bygg & Teknik*.

Europeiska rådet. (2024). *Energipriserna och försörjningstryggheten*. Hämtat från Consilium - webbplats: https://www.consilium.europa.eu/sv/policies/energy-prices-and-security-of-supply/

Fernando, J. (den 31 maj 2024). *Net Present Value (NPV): What It Means and Steps to Calculate It*. Hämtat från Investopedia: https://www.investopedia.com/terms/n/npv.asp

FN. (den 18 oktober 2022). *7 Hållbar energi för alla*. Hämtat från Globala Målen - webbplats: https://www.globalamalen.se/om-globala-malen/mal-7-hallbar-energi-alla/

FN. (oktober 2022). *9 Hållbar industri, innovationer och infrastruktur* . Hämtat från Globala Målen - webbplats: https://www.globalamalen.se/om-globala-malen/mal-9-hallbar-industri-innovationer-och-infrastruktur/

Fyrfasen. (u.d.). *Elnätsföretag och elhandelsföretag – vad är skillnaden?* Hämtat från Fyrfasen - webbplats: https://www.fyrfasen.se/kundservice/vanliga-fragor-och-svar/elnatsforetag-och-elhandelsforetag-vad-ar-skillnaden/

Göteborg energi. (u.d.). *Elnätsavgiften*. Hämtat från Göteborg energi -webbplats: https://www.goteborgenergi.se/privat/elnat/elnatsavgiften#overforing

Högberg, J.-M. (den 16 april 2020). *Frekvensreglering centralt för att hantera ökad andel förnybar energi i systemet*. Hämtat från Nordiska Projekt - webbplats: https://www.nordiskaprojekt.se/2020/04/16/frekvensreglering-centralt-for-att-hantera-okad-andel-fornybar-energi-i-systemet/

Huang, Z. (den 20 oktober 2023). Experimental study on efficiency improvement methods of vanadium redox flow battery for large-scale energy storage. *Electrochimica Acta*.

Kagan, J. (den 23 februari 2024). *Payback Period Explained, With the Formula and How to Calculate It*. Hämtat från Investopedia - webbplats: https://www.investopedia.com/terms/p/paybackperiod.asp

Khataee, A. (den 2 maj 2024). Intern mailkonversation med representant från dig-IT lab.

Konsumenternas Energimarknadsbyrå. (den 11 oktober 2022). *Elräknignen*. Hämtat från Energimarknadsbyran - webbplats: https://www.energimarknadsbyran.se/el/dina-avtal-och-kostnader/elrakningen/

KTH. (den 13 september 2023). *Dig-IT Lab - nytt kompetenscentrum snabbar upp byggbranchens digitalisering*. Hämtat från Kungliga Tekniska Högskolan - webbplats: https://www.kth.se/itm/nyheter/dig-it-lab-nytt-kompetenscentrum-snabbar-upp-byggbranschens-digitalisering-1.1277871

LDES Council. (2024). *About*. Hämtat från LDES Council - webbplats: https://www.ldescouncil.com/about/

Lernstål, E. (2024). *Analys av lönsamhetstrategier för elnätsanslutning i en kommersiell fastighet.* Uppsala: diva-portal.

Leyline Renewable Capital. (2024). *Long Duration Energy Storage: Use Cases, Technologies, and Outlook*. Hämtat från Leyline Capital - webbplats: https://www.leylinecapital.com/news/long-duration-energy-storage-use-cases-technologies-and-outlook

LIU, T. (den 9 oktober 2022). *World's Largest Flow Battery Energy Storage Station Connected to Grid*. Hämtat från Dalian Institute of Chemical Physics - webbplats: http://english.dicp.cas.cn/news/headline/202210/t20221010_321218.html

MacKenzie, W. (2022). *MARKET REPORT Long-duration energy storage 2022.*

Maurice, D. (den 30 Januari 2024). Harnessing redox flow batteries for industrial applications: Opportunities and future directions. *Journal of Power Sources*.

MIT News. (den 7 april 2023). *Flow batteries for grid-scale energy storage*. Hämtat från MIT-webbplats: https://news.mit.edu/2023/flow-batteries-grid-scale-energy-storage-0407

MVS. (u.d.). *Kapa Effekttopaar med Energilagring*. Hämtat från MVS - webbplats: https://www.mvs.se/kapa-effekttoppar-med-energilagring/

Nüüd, D. (2024, januari 20). *Vad är elnät och elhandel?* Retrieved from Öresundskraft - webbplats: https://www.oresundskraft.se/blogg/vad-ar-elnat-och-elhandel/

Naturvårdsverket. (den 11 03 2024). *Sveriges klimatarbete*. Hämtat från Naturvårdsverket - webbplats: https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/klimatomstallningen/sveriges-klimatarbete/

Pinflow. (u.d.). Hämtat från Pinflow - webbplats: http://www.pinflowes.com/Technology.html

Polarium. (2024). *Our Green Product Range*. Hämtat från Polarium - webbplats: https://polarium.com/green/

Renberg, Y. (december 2023). *Vad är skillnaden på elnät och elhandel?* Hämtat från Vattenfall - webbplats: https://www.vattenfall.se/fokus/tips-rad/skillnad-pa-elnat-och-elhandel/

Scandic. (2023). *Års- och hållbarhetsredovisning 2023.* Stockholm.

Skyllas-Kazacos, M. (september 1991). Characteristics and performance of 1 kW UNSW vanadium redox battery. *Journal of Power Sources*, ss. 399-404.

Stauffer, N. W. (den 7 april 2023). *Flow batteries for grid-scale energy storage*. Hämtat från MIT - webbplats: https://news.mit.edu/2023/flow-batteries-grid-scale-energy-storage-0407

Sweden.se. (den 23 maj 2024). *Taxes in Sweden*. Hämtat från Sweden.se - webbplats: https://sweden.se/life/society/taxes-in-sweden

Svenska kraftnät. (den 12 januari 2023). *Balansering av kraftsystemt*. Hämtat från SVK - webbplats: https://www.svk.se/om-kraftsystemet/om-systemansvaret/balansering-av-kraftsystemet/

Svenska kraftnät. (den 15 november 2023). *Bidra med FFR*. Hämtat från SVK - webbplats: https://www.svk.se/aktorsportalen/bidra-med-reserver/om-olika-reserver/ffr/bidra-med-ffr/

Svenska kraftnät. (den 9 maj 2023). *Snabb frekvensreserv (FFR)*. Hämtat från SVK - webbplats: https://www.svk.se/aktorsportalen/bidra-med-reserver/om-olika-reserver/ffr/

Svenska kraftnät. (den 3 maj 2024). *Automatisk frekvensåterställningsreserv (aFRR)*. Hämtat från SVK - webbplats: https://www.svk.se/aktorsportalen/bidra-med-reserver/om-olika-reserver/afrr/

Svenska kraftnät. (den 22 mars 2024). *Behov av reserver idag och i framtiden*. Hämtat från SVK - webbplats: https://www.svk.se/aktorsportalen/bidra-med-reserver/behov-av-reserver-nu-och-i-framtiden/

Svenska kraftnät. (den 30 april 2024). *Delta på FCR- marknaderna med resurser med begränsad energireserv – LER*. Hämtat från SVK - webbplats: https://www.svk.se/aktorsportalen/bidra-med-reserver/bli-leverantor-av-reserver/bidra-med-fcr-afrr-eller-mfrr/delta-pa-fcr--marknaderna-med-resurser-med-begransad-energireserv--ler/

Svenska kraftnät. (den 19 januari 2024). *Framtida volymbehov*. Hämtat från SVK - webbplats: https://www.svk.se/aktorsportalen/bidra-med-reserver/behov-av-reserver-nu-och-i-framtiden/framtida-volymbehov/

Svenska kraftnät. (den 30 april 2024). *Frekvenshållningsreserv normaldrift (FCR-N)*. Hämtat från SVK - webbplats: https://www.svk.se/aktorsportalen/bidra-med-reserver/om-olika-reserver/fcr-n/

Svenska kraftnät. (den 30 april 2024). *Frekvenshållningsreserv störning nedreglering (FCR-D ned)*. Hämtat från SVK - webbplats: https://www.svk.se/aktorsportalen/bidra-med-reserver/om-olika-reserver/fcr-d-ned/

Svenska kraftnät. (den 30 april 2024). *Frekvenshållningsreserv störning uppreglering (FCR-D upp)*. Hämtat från SVK - webbplats: https://www.svk.se/aktorsportalen/bidra-med-reserver/om-olika-reserver/fcr-d-upp/

Svenska kraftnät. (den 22 mars 2024). *Manuell frekvensåterställningsreserv (mFRR)*. Hämtat från SVK - webbplats: https://www.svk.se/aktorsportalen/bidra-med-reserver/om-olika-reserver/mfrr/

Svenska kraftnät. (den 12 april 2024). *Om olika energikällor*. Hämtat från SVK - webbplats: https://www.svk.se/om-kraftsystemet/om-olika-energikallor/

Svenska kraftnät. (den 30 april 2024). *Så kan du som privatperson bidra med stödtjänster*. Hämtat från SVK - webbplats: https://www.svk.se/om-kraftsystemet/om-systemansvaret/verktyg-for-systemdrift/stodtjanster-och-avhjalpande-atgarder/sa-kan-du-som-privatperson-bidra-med-stodtjanster/

Svenska kraftnät. (den 11 april 2024). *Utbud på marknaderna för reserver*. Hämtat från SVK - webbplats: https://www.svk.se/aktorsportalen/bidra-med-reserver/behov-av-reserver-nu-och-i-framtiden/utbud-pa-marknaderna-for-reserver/

Uhrig, M. (November 2016). Lithium-based vs. Vanadium Redox Flow Batteries – A Comparison for Home Storage Systems. *Energy Procedia*, ss. 35-43.

Vattenfall. (den 29 april 2024). *Ett elnät i balans - Svenska kraftnäts reserver för balansering*. Hämtat från Vattenfall - webbplats: https://energyplaza.vattenfall.se/blogg/ett-elnat-i-balans-svenska-kraftnats-reserver-for-elsystemeto

Vrána, J. (den 24 maj 2024). "Mailkonversation med Jiří Vrána, Medgrundare Pinflow".

Zhan, D. (2014). Overview of Redow Flow Battery. i F. Shi, *Reactor and Process Design in Sustainable Energy Technology* (ss. 62-66). Pittsburgh, Pennsylvania: Elsevier.

Öljemark, J. (den 8 augusti 2023). *Elbehov*. Hämtat från Ekonomifakta - Webbplats: https://www.ekonomifakta.se/sakomraden/elfakta/energibehov/elbehov_1211736.html