



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2023 30 stp
Fakultet for realfag og teknologi

En flermålsanalyse av batterisystemer for balansering av det norske kraftsystemet

Oskar Leknes
Industriell økonomi

Forord

Denne masteroppgaven markerer slutten på min femårige tid som masterstudent i industriell økonomi ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet. Det har vært en periode med nye venner, utfordrende og spennende pensum og mange fine opplevelser. Jeg sitter igjen med ny innsikt og mange gode minner som jeg tar med meg videre i livet.

Jeg ønsker å takke min hovedveileder Jorge Mario Marchetti som har kommet med verdifulle innspill til min oppgave. Du har kommet med god hjelp og bidratt til at jeg har fått denne oppgaven i havn.

Jeg ønsker å rette en takk til alle forelesere og medstudenter som jeg har hatt i min tid på NMBU, som har gjort min studietilværelse helt fantastisk. En ekstra takk vil jeg sende til gjengen som har sittet fast på TF1-254: Martin Jonathan Økland, Erik Johan Lovén, Andreas Ranje og Atle Elling Hanssen. Alle problemløsinger, forelesninger, samtaler, teite diskusjoner, felles frustrasjoner- og gleder har gjort mitt opphold på NMBU til en sann fornøyelse. Uten dere hadde mitt studentliv vært vesentlig fattigere.

Til slutt vil jeg takke Marianne, min samboer hjemme, som har holdt ut med meg og som har tatt seg ekstra av dattera vår Lotte denne våren. Uten din innsats ville jeg ikke kunne skrive dette forordet nå.

Ås, 13 juni 2023



Oskar Leknes

Sammendrag

Norge skal de neste årene bygge ut en stor mengde uregulerbar energiproduksjon, for å møte dagens og fremtidens energibehov. Dette skjer i en tid hvor Norge i større grad er påkoblet et Europa som også i stor grad skal lene seg på uregulerbar energiproduksjon fremover. Kraftsystemet må til enhver tid være i balanse, og det er nettopp denne balansen som vil bli en stor utfordring å opprettholde i fremtidens kraftsystem. En av løsningene, på denne utfordringen, er å benytte stasjonære batterisystemer til å bidra til balansering av det norske kraftsystemet.

I denne oppgaven har det blitt prøvd å finne ut hvilket batterisystem som er best egnet til å kunne balansere det norske kraftsystemet. For å balansere kraftsystemet, skulle batterisystemet levere raske frekvensreserver (FFR) til Statnett og utnytte arbitrasje i kraftprisen. For å finne det beste batterisystemet ble det i denne oppgaven gjennomført en flermålsanalyse. En flermålsanalyse kan bidra til å forenkle bildet for beslutningstakere, når det er mye informasjon å ta inn over seg. Det ble lett etter batterisystemer som aktører kan investere i, og det ble identifisert fire alternative batterisystemer som ble inkludert i flermålsanalysen. Disse fire batterisystemene var li-ionbatterisystem, vanadium redoks flytbatterisystem (VRFB), saltvannsbatterisystem og li-ionbatterisystem basert på brukte li-ionceller.

Et målhierarki ble etablert. De fire alternativene hadde ulike verdier på evalueringskriteriene pris, effekt, levetid, DoD (Depth of Discharge), usikkerhet, energitetthet, effektivitet, degradering og miljøkonsekvenser. Disse verdiene til evalueringskriteriene påvirket på hver sin måte hvor godt egnet de ulike batterisystemene var til å levere FFR og utnytte arbitrasje i kraftprisen. Det ble satt sammen en flermålsmodell hvor alle verdiene til de ulike evalueringskriteriene oppnådde ulik score. Hvert evalueringskriterie ble vektet etter hvor mye en endring i score var estimert å påvirke netto nåverdi (NNV). Pris fikk en vekt på 10, levetid fikk en vekt på 2,0, effekt fikk en vekt på 1,3, DoD, effektivitet og usikkerhet fikk en vekt på 1,0, degradering fikk en vekt på 0,50, energitetthet eller volum fikk en vekt på 0,20 og miljøkonsekvenser fikk en vekt på 0,13.

Li-ionbatterisystemet basert på bruke li-ionceller ble i analysen rangert øverst med en total score på 215. Li-ionbatterisystemet med nye celler fikk en total score på 167, VRFB-systemet fikk en total score på 133 mens saltvannsbatterisystemet fikk en total score på 90 poeng og ble rangert dårligst. Av evalueringskriteriene var det den lave prisen som gjorde at li-ionbatterisystemet (brukt) skilte seg markant ut og sørget for å bli rangert øverst. Alle batterisystemene hadde minst et kriterie de scorete best på. Til tross for den høye totalscoren til vinneren, anbefales ingen av batterisystemene i denne flermålsanalysen til balansering av det norske kraftsystemet, på grunn av negativ NNV. Det er første gang en slik flermålsanalyse av batterisystemer til balansering av det norske kraftsystemet er gjennomført, som undertegnede kjenner til. Videre undersøkelse og optimalisering av flermålsanalysen kan bidra til å øke tilliten til en fremtidig modell, som kan føre til en ny rangering og anbefaling.

Abstract

Over the next few years, Norway will expand a significant amount in the production of unregulated energy in order to meet future energy demand. This is happening at a time when Norway is increasingly interconnected with Europe, which will rely heavily on unregulated energy production. The power system must always be in balance, and maintaining this balance will be a significant challenge in the future power system. Part of the solution to this challenge could be to use stationary battery systems to help balance the Norwegian power system.

This study has tried to determine which battery system is best suited to help balance the Norwegian power system. To balance the power system, the battery system should provide FFR to Statnett and exploit arbitrage in the electricity price. To find the best battery system, a multi-criteria decision analysis (MCDA) was carried out in this study. A MCDA can simplify the picture for decision-makers when there is a lot of information to digest. The study looked for battery systems that decision-makers could invest in, and four battery systems were identified and included in the MCDA. These four battery systems were li-ion battery systems, vanadium redox flow battery (VRFB) systems, saltwater battery systems and li-ion battery systems based on used li-ion cells.

A goal hierarchy was established. The four alternatives, li-ion battery system, VRFB system, saltwater battery system, and used li-ion battery system had different values for each evaluation criteria, including price, power, lifetime, depth of discharge (DoD), uncertainty, energy density, efficiency, degradation, and environmental impact. These evaluation criteria values influenced how well-suited the battery systems were to provide FFR and exploit arbitrage in the electricity price. A MCDA model was put together where all values of the various evaluation criteria achieved different scores. Each evaluation criterion was weighed according to how much a change in score was estimated to affect net present value (NPV). Price received a weight of 10, lifetime received a weight of 2.0, power received a weight of 1.3, DoD, efficiency, and uncertainty received a weight of 1.0 each, degradation received a weight of 0.50, energy density or volume received a weight of 0.20, and environmental impact received a weight of 0.13.

The li-ion battery system based on used li-ion cells was ranked highest in the analysis with a total score of 215. The li-ion battery system with new cells received a total score of 167, the VRFB system received a total score of 133, while the saltwater battery system received a total score of 90 and was ranked the lowest. Among the evaluation criteria, it was the low price that made the used li-ion battery system stand out significantly and ensured it was ranked highest. All battery systems had at least one criterion they scored highest on. Despite the high total score of the winner, none of the battery systems in this MCDA are recommended for balancing the Norwegian power system. This is due to negative NPV. This is the first time such an analysis of battery systems for balancing the Norwegian power system has been conducted to the best of my knowledge. Therefore further investigation and optimization of the MCDA can contribute to increasing trust in a future model, potentially leading to a new ranking and recommendation.

Innhold

Forord	i
Sammendrag	ii
Abstract	iii
Figurer	vi
Tabeller	vii
1 Introduksjon	1
1.1 Problemstilling	2
2 Teori	3
2.1 Kraftsystemet	3
2.1.1 Tekniske krav FFR	7
2.1.2 FFR marked	8
2.1.3 Kraftpriser	9
2.2 Hva er et batteri	11
2.2.1 Galvanisk celle	11
2.2.2 Elektrolysecelle	11
2.2.3 Primær- og sekundærbatteri	12
2.2.4 Kjemien bak	12
2.2.5 Batteriets egenskaper	13
2.2.6 Kapasitet og effekt	13
2.2.7 Nettokapasitet	13
2.2.8 Degradering og levetid	14
2.2.9 Energitetthet	14
2.2.10 Effektivitet	14
2.3 Ulike batteriteknologier	15
2.3.1 Litium-ion batteri	15
2.3.2 Vanadium redoks flytbatteri	15
2.3.3 Saltvannsbatteri	17
2.4 Flermålsanalyse	18
2.4.1 Problemanalyse og strukturering	19
2.4.2 Modellutvikling	19
2.4.3 Evaluering av alternativer	21
2.4.4 Håndtering av usikkerhet	21
2.4.5 Sammenveing/sammenstilling	22
2.5 Viktige parametere og begreper	23
2.5.1 Pris	23
2.5.2 Lagerkostnad	23
2.5.3 Netto nåverdi	23
2.5.4 Miljøkonsekvenser	24
3 Metode	25

3.1	Problemanalyse og strukturering	25
3.2	Modellutvikling	26
3.3	Evaluering av alternativene	27
3.4	Håndtering av usikkerhet	27
3.5	Sammenstilling	27
4	Resultat	28
4.1	Modellutvikling	28
4.2	Evaluering av alternativene	40
5	Diskusjon	42
5.1	Problemanalyse og strukturering	42
5.2	Modellen	44
5.3	Rangering av alternativene	47
6	Konklusjon	49
6.1	Konklusjon	49
6.2	Videre arbeid	50
	Referanser	51
A	Begrunnelse for alternativenes verdier	53
A.1	Li-ionbatterisystem	53
A.2	VRFB-system	53
A.3	Saltvannsbatterisystem	54
A.4	Li-ionbatterisystem (brukt)	55
B	Script	56
B.1	Kode del 1	56
B.2	Kode del 2	57
C	Egenskaper som ikke ble tatt med	58
C.1	Batteristyringssystem	58
C.2	Sikkerhet	58
C.3	Topp opp- og utladning	58
C.4	Effektivitet ved ulike utladningshastigheter	58

Figurer

1	Treghet i kraftsystemet 2021	4
2	Frekvensavvik 2001-2021	5
3	Systemansvarskostnader 2011-2021	6
4	Reservesamspill	7
5	Laveste inertinivå 10 prosent av tiden 2017-2021	9
6	Prisvariasjon	10
7	Galvanisk celle	11
8	Elektrolysecelle	12
9	Redoks flytbatteri	16
10	Flermålsanalyseprosessen	18
11	Målhierarki	20
12	Målhierarki for balansering av det norske kraftsystemet	26
13	Pris og NNV	28
14	Levetid og NNV	30
15	Effekt og NNV	31
16	DoD og NNV	32
17	Volum og NNV	33
18	Effektivitet og NNV	34
19	Degradering og NNV	35
20	Usikkerhet og NNV	36
21	Miljø og NNV	37
22	Kode del 1	56
23	Kode del 2	57

Tabeller

1	Score for ulik pris	29
2	Score for ulik levetid	30
3	Score for ulik effekt	31
4	Score for ulik DoD	32
5	Score for ulik volum	33
6	Score for ulik effektivitet	34
7	Score for ulik degradering	35
8	Score for ulik usikkerhet	36
9	Score for ulik miljøkonsekvens	37
10	Score for alle evalueringskriterier	38
11	Vekting av evalueringskriterier	39
12	Estimering av verdier til alternativene	40
13	Evaluering av alternativene	41

Forkortelser

Forkortelse	Betydning
BMS	Battery Management System
DoD	Depth of Discharge
EoL	End of Life
FCR	Primærreserver
FFN	Forening for finansfag Norge
FFR	Raske effektreserver
GWP	Global Warming Potensial
MCDA	Multi-Criteria Decision Analysis
NNV	Netto Nåverdi
NPV	Net Present Value
NVE	Norges Vassdrags- og Energidirektorat
SoH	State of Health
TSO	Transmission System Operator
VRFB	Vanadium Redox Flow Battery

1 Introduksjon

Verdenssamfunnet står ovenfor enorme utfordringer for å hindre for store irreversible klimaendringer. CO₂-utslippene fører til at verden blir varmere og har medført at Norge, gjennom Parisavtalen har forpliktet seg til å kutte CO₂-utslippene sine med 55 prosent innen 2030 og ned til netto null innen 2050 [1]. For å klare dette må man ta i bruk mange tiltak, men et tiltak som stadig utpeker seg er å elektrifisere det som kan elektrifiseres.

For å elektrifisere samfunnet, kreves det økt produksjon av elektrisk energi. Norge har i lang tid kunne lene seg på regulerbar vannkraftproduksjon, som har bidratt til et kraftsystem som har vært forholdsvis enkelt å kontrollere. Norges Vassdrags- og Energidirektorat (NVE) peker på i en rapport at 17 av 28 TWh, av økningen i kraftproduksjon frem mot 2040 i Norge, skal komme fra uregulerbare kilder som vindenergi og solenergi [2]. Samtidig som Norge er koblet på et Europa som i større og større grad har uregulerbar kraft, gjør dette at det potensielt sett kan bli vesentlig mer krevende å holde kraftsystemet i balanse. I et slikt scenario, er det umulig for markedsaktører og politikere å overse behovet for økt fleksibilitet. En teknologi i stor utvikling, som stadig pekes på som nøkkelen til å lykkes med elektrifiseringen av samfunnet og bidra med til å sikre nok fleksibilitet, er batterier [3].

Batterier har i lang tid vært en stor del av hverdagen vår. Batterier har blitt brukt i leker, telefoner, høreapparat, fossile biler, bærbare PCer og fjernkontrollen hjemme [4]. Behovet for å elektrifisere samfunnet og en overgang til mer bruk av uregulerbar fornybar energiproduksjon, for å nå netto null utslipp i 2050, gjør at batterier kommer til å spille en større og større rolle i tiden fremover. Batterier har lenge blitt brukt for å holde kraftsystemet i andre land i balanse, men med høyere behov for raske kraftreserver og fallende batteripriser, åpner muligheten for at batterier kan fungere som er reserve i kraftsystemet.

Batterier ser enkle ut på utsiden og de fleste av oss spør seg ikke hva som er inni et batteri. Når man først åpner opp batteriverden og ser hva som er på innsiden av et batteri vil man oppdage et kompleks organisering av mange komponenter [5]. For forskere som tester og utvikler batterier, så har batterier en rekke utfordringer: hvordan kan man forbedre batterier, kan man bruke bedre materiale eller endre strukturen for å utbedre en liten del av egenskapene til batteriet. Det forskes utrolig mye på batteriteknologi og i perioden 2005-2018 har det vært en gjennomsnittlig økning i nye patenter på 14 prosent hvert år. Det ble i 2018 etablert 704 prosent flere patenter enn i år 2000 og denne utviklingen er forventet til å fortsette i tiden fremover [3].

I tiden fremover kan beslutningstakere rundt omkring forholde seg til en enorm mengde informasjon for å finne ut hva slags batterisystem som er best til sitt bruk. Batterisystemer kan settes sammen på nærmest uendelig mange forskjellige måter. Hva slags material skal en bruke til anoden og katoden, hva slags elektrolytt, hvor mange celler skal batterisystemet bestå av, hvordan er geometrien til disse cellen og så videre. Hver måte å sette sammen et batterisystem på, fører til et unikt sett med ulike egenskaper. Et batterisystem kan for eksempel være rimelig og ha lang holdbarhet men være altfor stort og tungt, mens et annet batterisystem kan være lettere og ta mindre plass, men er vesentlig dyrere å produsere. Samtidig vil ulike bruksområder ha ulike krav til ulike egenskaper. For eksempel vil det være lite hensiktsmessig om et fly skal ha et unødvendig tungt batteri med seg flere tusen meter opp i lufta, mens et stasjonært batterisystem som skal balansere kraftsystemet ikke har dette samme problemet. Den enorme mengden med forskning og ny tilgjengelig informasjon, gjør det ikke nødvendigvis enklere å velge riktig batterisystem. I en slik situasjon kommer en godt gjennomført flermålsanalyse til sin nytte.

1.1 Problemstilling

Hovedformålet med denne oppgaven var å danne et sammenligningsgrunnlag som avgjør hvilket batterisystem som er best egnet til å bidra til balansering av kraftsystemet i Norge. For å operasjonalisere hva balansering av kraftsystemet i Norge tilsvarer, ble problemstillingen å finne hvilket batterisystem som er best egnet til å levere raske frekvensreserver (FFR) til Statnett kombinert med å utnytte arbitrasje i kraftprisen. For å kunne danne et sammenligningsgrunnlag og finne det beste batterisystemet til å balansere det norske kraftsystemet, ble det gjennomført en flermålsanalyse. Motivasjonen for å gjennomføre flermålsanalysen var:

1. Ta et nytt steg for å skape en konsensus for hvilke egenskaper til et batterisystem som er viktig for å bidra til balansering av det norske kraftsystemet.
2. Etablere et sammenligningsgrunnlag som kan brukes for å sammenligne nåværende og fremtidige batterisystem og fatte beslutninger for hvilket batterisystem som er best
3. Illustrere hvilke trade-offs som skal til for å utbedre et batterisystem for å best mulig kunne bidra til balansering av kraftsystemet i Norge.

Hovedmålet til denne oppgaven kan deles inn i to: Danne et sammenligningsgrunnlag; finne ut hvilket batterisystem som er best. Sammenligningsgrunnlaget vil kunne gi beslutningstakere og forskere nyttig informasjon. Batteriutviklere kan bedre forstå hvilke egenskaper som må forbedres på detaljnivå, mens beslutningstakeren har et grunnlag å forankre sin beslutning i. Resultatet av flermålsanalysen vil være interessant og det kan være nyttig for beslutningstakere og batteriutviklere å få en økt innsikt i hvilke batterisystem som gjør det best og hva som skal til for å skape morgendagens beste batterisystem.

2 Teori

Teoridelen er delt inn fem ulike deler. Hver del er ment å kunne leses uavhengig av hverandre, men gir til sammen et grunnlag for resten av oppgaven. I første av teoridelen vil oppgaven først gi en forklaring på hvordan kraftsystemet fungerer. Her vil oppgaven gjennomgå FFR og hvordan prisnivået på elektrisk energi varierer. I andre del av teorien vil et batteri sin oppbygging og virkemåte bli gjort rede for. Her vil også batteriegenskaper, relevante for denne oppgaven, bli gjennomgått og forklart på et overordnet nivå. I del tre av teorien vil tre ulike batteriteknologier bli gjennomgått. Dette er de tre batteriteknologiene som blir brukt i batterisystemene i flermålsanalysen senere. I fjerde del av teorien vil det bli gjennomgått hvordan en flermålsanalyse kan være bygd opp. Til slutt vil det kort bli gjennomgått viktige parametere og begreper som er nødvendig å ha med seg før en tar fatt på selve gjennomføringen av flermålsanalysen.

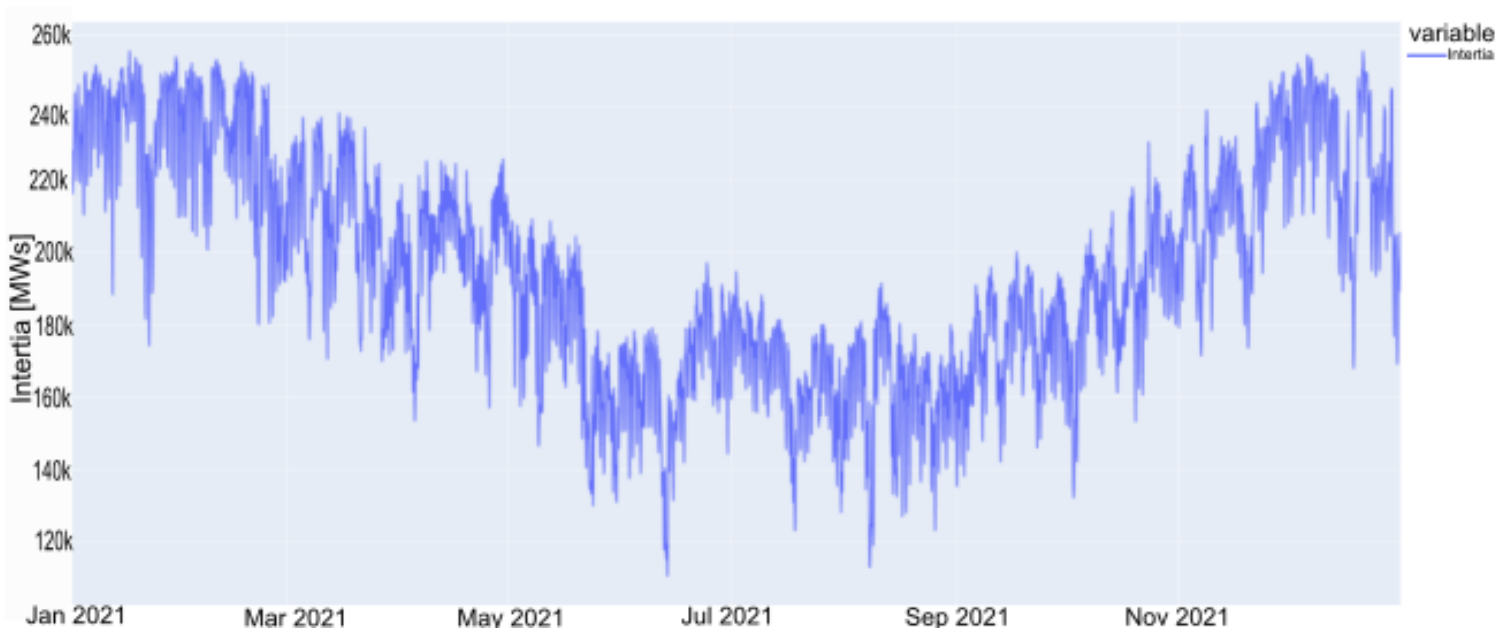
2.1 Kraftsystemet

Kraftsystemet transporterer til enhver tid elektrisk energi fra der det blir produsert til der det blir brukt. Det må hele tiden være et samsvar mellom mengden elektrisk energi produsert og brukt for å holde kraftsystemet i balanse. Kraftnettet driftes på vekselstrøm og har en frekvens på 50,0 Hz. Avviket frekvensen for langt fra 50,0 Hz kan de medføre skader på infrastruktur og påkoblede apparater. Det er i dag Statnett sin oppgave å sørge for denne balansen [6].

Historisk har veldig mye av kraften i Norge blitt produsert av vannkraft. Store deler av denne kraftproduksjonen har vært regulerbar. Det vil si at man kan skru opp og ned produksjonen for å hele tiden produsere like mye elektrisk energi som blir brukt. I det siste har Norge i større grad blitt koblet til Europa ved hjelp av utenlandskabler. Disse kablene benytter i stor grad likestrøm og bidrar ikke med regulerbarhet eller treghet til kraftnettet [7].

Treghet er en egenskap i kraftnettet som gjør kraftnettet mer robust mot akutte endringer i produksjon og forbruk av elektrisk energi. Tregheten finnes i stor grad i synkrone turbiner. I Europa er ofte disse turbinene påkoblet via gasskraftverk, mens de i Norge er påkoblet i vannkraftverk.

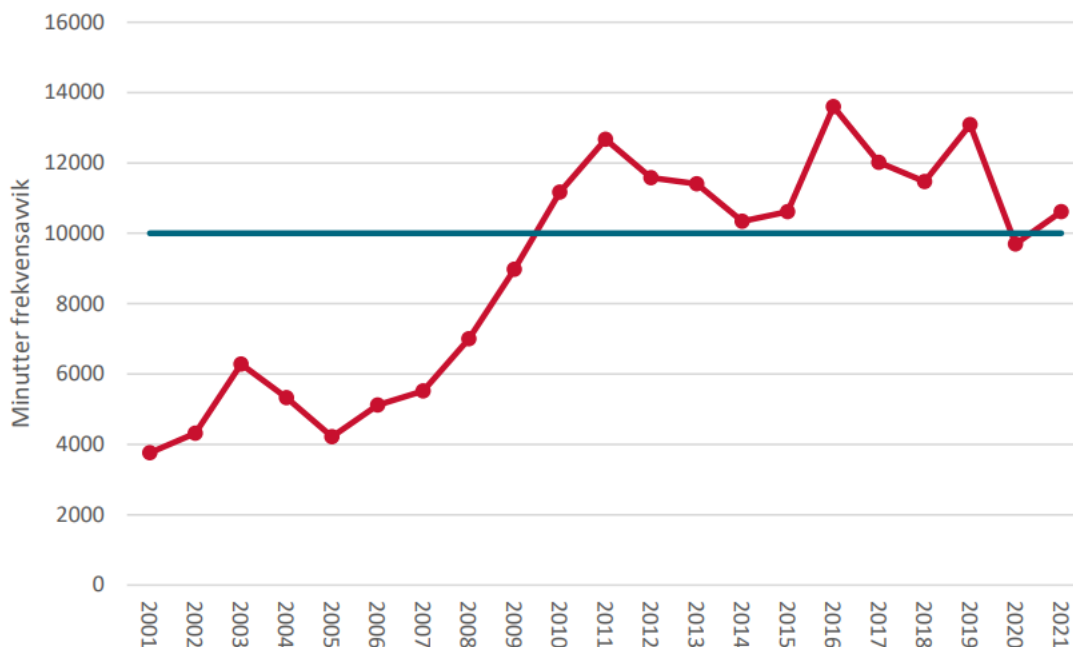
Figur 1 viser hvordan nivået av treghet gjennom 2021 varierte. Som en kan se er nivået av treghet i kraftsystemet lavere i sommermånedene enn i vintermånedene. Om sommeren, når etterspørselen etter elektrisk energi og prisen per kilowatttime er lav, skrur vannkraftprodusentene av kraftverkene sine. Vannkraftverkene sparer vannet mot vinteren hvor behovet for elektrisk energi er høyere og produsentene får mer penger igjen for kraftproduksjonen deres. Dette fører til at mengden treghet er lavere om sommeren. Dette gjelder i sær grad de dagene hvor forbruket er ekstra lavt, som typisk vil være om natten og i helger.



Figur 1: Figuren viser hvordan nivået av treghet målt i MWs varierer i løpet av 2021. Hentet med tillatelse fra Statnett sin rapport fra systemansvarlig[7].

NVE estimerer at omtrent 6 TWh kommer til å komme fra solkraft, 11 TWh fra vindkraft og 11 TWh fra vannkraft frem mot 2040 [2]. Verken solkraft eller vindkraft bidrar med regulerbarhet eller treghet til kraftnettet. Det medfører at andelen regulerbar kraftproduksjon og den relative tregheten i forhold til total kraftproduksjon blir lavere. I perioder hvor vannkraftverkene holder igjen kraftproduksjon for å spare det til senere tidspunkt hvor det er enda større behov for vannkraft, vil det være lite treghet i kraftnettet og faren for avvik i frekvensen på kraftnettet vil være tilstedet.

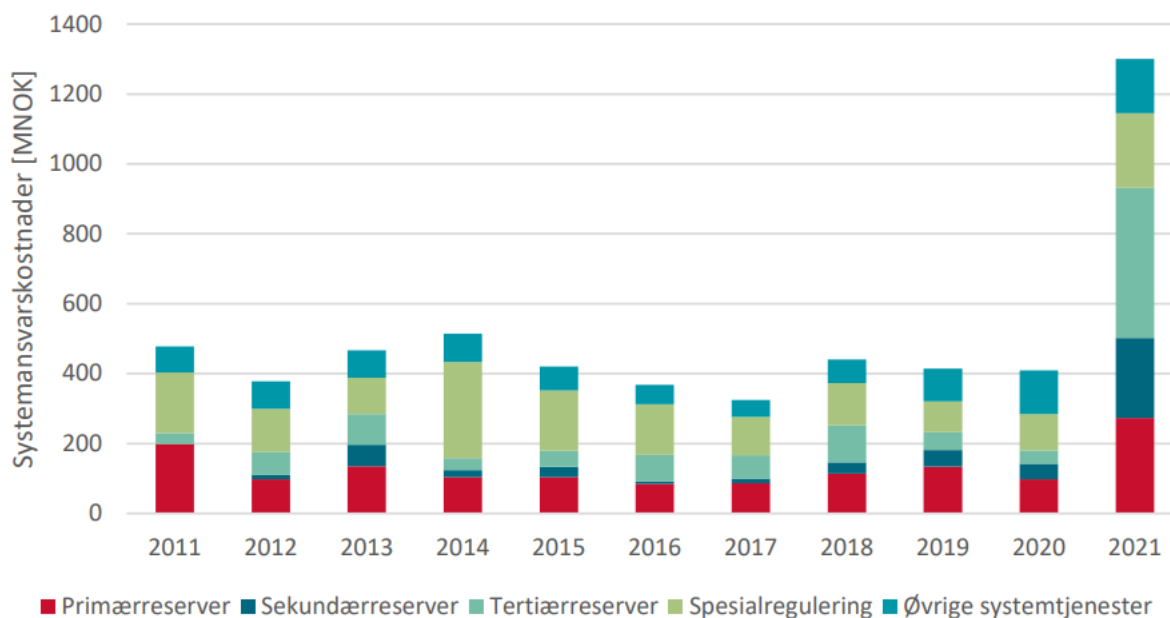
Statnett har i Norge ansvaret for kraftsystemet og å håndtere og forhindre ubalanser i kraftsystemet vårt. Dette innebærer at frekvensen til kraftsystemet skal holdes innenfor $50 \pm 0,1$ Hz. Er frekvensen til kraftsystemet utenfor dette området, regnes det som frekvensavvik. Selv om det regnes som frekvensavvik når frekvensen er utenfor det gitte intervallet, er frekvensavvik noe som forekommer hele året og er illustrert i figur 2 [8].



Figur 2: Figuren viser antall minutter med frekvensavvik i perioden 2001 til 2021. Den blå streken viser akseptabelt nivå. Figuren er hentet, med tillatelse, fra NVE sin rapport om DRIFTEN AV KRAFTSYSTEMET 2021[8].

Statnett er med i et samarbeid med de andre TSOene (Transmission System Operator) i Norden hvor man har satt at et akseptabelt nivå på frekvenskvalitet er på 10 000 minutter per år. Det er også fastsatt en øvre grense på 15 000 minutter per år [8]. Som en ser av figur 2, har minutter med frekvensavvik økt fra 2021 og til 2010-tallet. På 2010-tallet har frekvensavviket ligget på mellom 10 000 minutter og 14 000 minutter per år. I 2021 var frekvensavviket på 10 618 minutter. Frekvensavviket i 2021 er over det akseptable måltallet på 10 000 minutter, men lavere de siste årene, hvis en ser bort i fra 2020 [8].

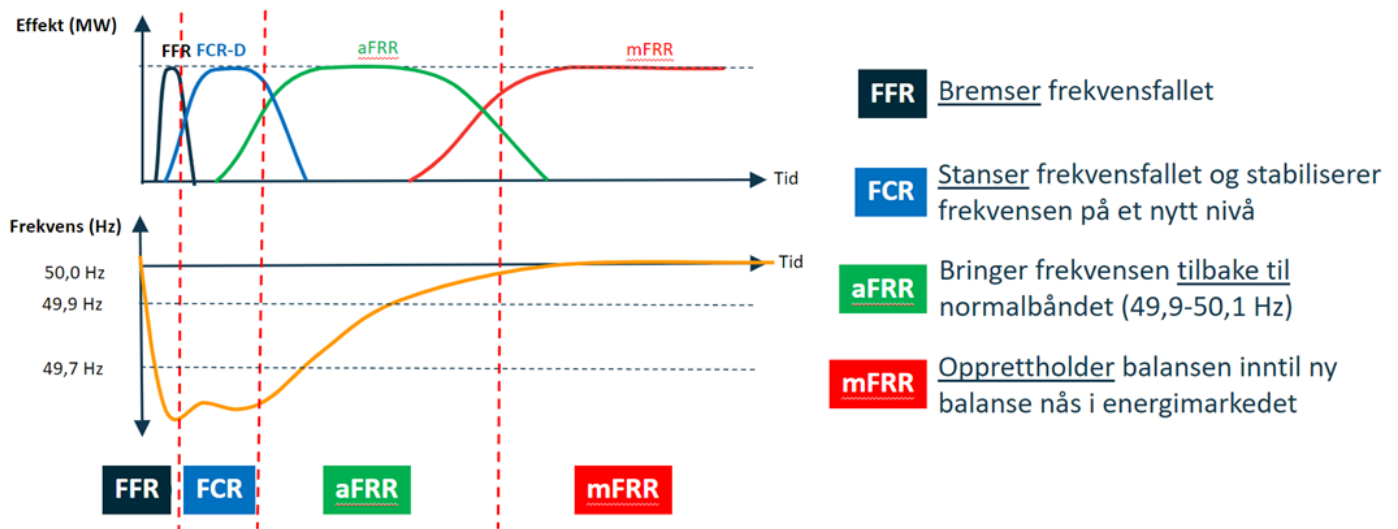
Den negative utviklingen av frekvenskvalitet har de siste årene stagnert. Statnett peker i sin rapport på at stagneringen er et tegn på tiltak som de har igangsatt har gitt effekt [7]. Figur 3 viser hvordan systemansvarskostnadene har utviklet seg de siste ti årene. Kostnadene har ligget ganske stabilt rundt 400 MNOK i perioden 2011-2020 med en stor økning til 1 300 MNOK i 2021. Systemansvarskostnadene henger tett sammen med kraftprisen og siden kraftprisen var uvanlig høy i 2021, var systemansvarskostnadene i 2021 også uvanlig høye [8][7].



Figur 3: Figuren viser hvor mye penger Statnett har brukt på systemansvarskostnader i 2021. Figuren er hentet fra DRIFTEN AV KRAFTSYSTEMET med tillatelse fra NVE[8].

Endringen i produksjonsmikks i Norge og Norden, samt økt overføringskapasitet til Europa vil føre til at frekvenskvaliteten i Norge vil bli ytterligere utfordret. Statnett regner med at systemansvarskostnadene fremover vil ligge vesentlig høyere enn perioden 2011-2020 [7].

For å håndtere frekvensavvik som oppstår i kraftsystemet, benyttes ulike systemtjenester. Systemtjenestene skal sørge for å holde kraftsystemet i balanse og benytter blant annet fire ulike typer reserver: raske, primære, sekundære og tertiære reserver. De ulike reservene har ulike egenskaper, men felles for alle er å holde kraftsystemet i balanse rundt 50 Hz. Det gjennomføres flere tiltak for å holde balansen i kraftsystemet, men de tiltakene vurderes å ligge utenfor denne oppgavens fokusområde. Samspillet mellom de ulike reservene er illustrert i figur 4



Figur 4: Figuren illustrerer størrelsen på effekten til de ulike reservene i MW, når det oppstår et frekvensavvik. Figuren er hentet fra Introduksjon til reservemarkedene med tillatelse fra Statnett[9].

Som en kan se av figur 4, så settes FFR inn for å bremse frekvensfallet først når det oppstår et frekvensavvik. Deretter tar FCR (Primærreserver) over for å videre stabilisere frekvensen. aFRR (Sekundærreserver) bringer frekvensen opp mot 50,0 Hz før mFRR (Tertiærreserver) opprettholder frekvensen til ny balanse nås. Som en kan se er det et stort samspill å til enhver tid holde kraftsystemet i balanse [9]. Av reservene illustrert over, er det FFR som er hovedfokuset for denne oppgaven.

FFR er et produkt som ble introdusert i 2020 for å håndtere de store og raske endringene som oppstår, for å opprettholde momentant balanse. De raske effektreservene kalles FFR, Fast frequency reserves på engelsk, og aktiveres for å hindre at frekvensen går under 49,0 Hz når større feil i kraftsystemet oppstår. Man er derfor avhengig av at FFR responderer raskt og kraftig når de først. Responstiden er på under ett sekund og effekten kan være på flere titalls megawatt fra leverandør av FFR [9].

2.1.1 Tekniske krav FFR

For å kunne levere FFR må man kunne levere minst 1,0 MW. Hvis man har flere enheter som tilsammen kan levere minst 1,0 MW og tilfredsstillere øvrige krav for å levere FFR, kan FFR tilbys. Det er en øvre grense på 50,0 MW [10]. Hvis man allerede leverer effekt til kraftsystemet, så er det endringen i effekten en leverer som blir FFR man kan tilby.

FFR skal respondere raskt, med aktiv effekt ved et frekvensavvik. For å kunne levere FFR må man velge mellom og kunne gjennomføre et av følgende alternativ. Alternativ A, ved en målt frekvens på 49,7 Hz må man levere lovt effekt innen maksimalt 1,30 sekund. Alternativ B, ved en målt frekvens på 49,6 Hz må man kunne levere lovt effekt på under 1,00 sekund. Alternativ C, ved en målt effekt på 49,5 Hz, må man kunne levere lovt effekt på under 0,70 sekund. Dette gjelder både ved kortvarig og langvarig FFR [11].

Når en stiller FFR til disposisjon for Statnett kan man velge mellom å tilby kortvarig FFR eller

langvarig. Ved langvarig FFR må man gi kvalifiserte FFR i minst 30 sekunder. Etter 30 sekunder, trenger man ikke lenger å tilby effekt og man kan trappe ned så fort en ønsker. Når en skal hente seg inn igjen etter å levert FFR, for eksempel ved å lade opp batteriet som har avgitt energi, så kan man maksimalt sluke 25 prosent av effekt som har blitt levert som FFR. Denne innhenting kan etter langvarig FFR starte med engang etter man har støttet kraftsystemet med FFR i 30 sekunder [11].

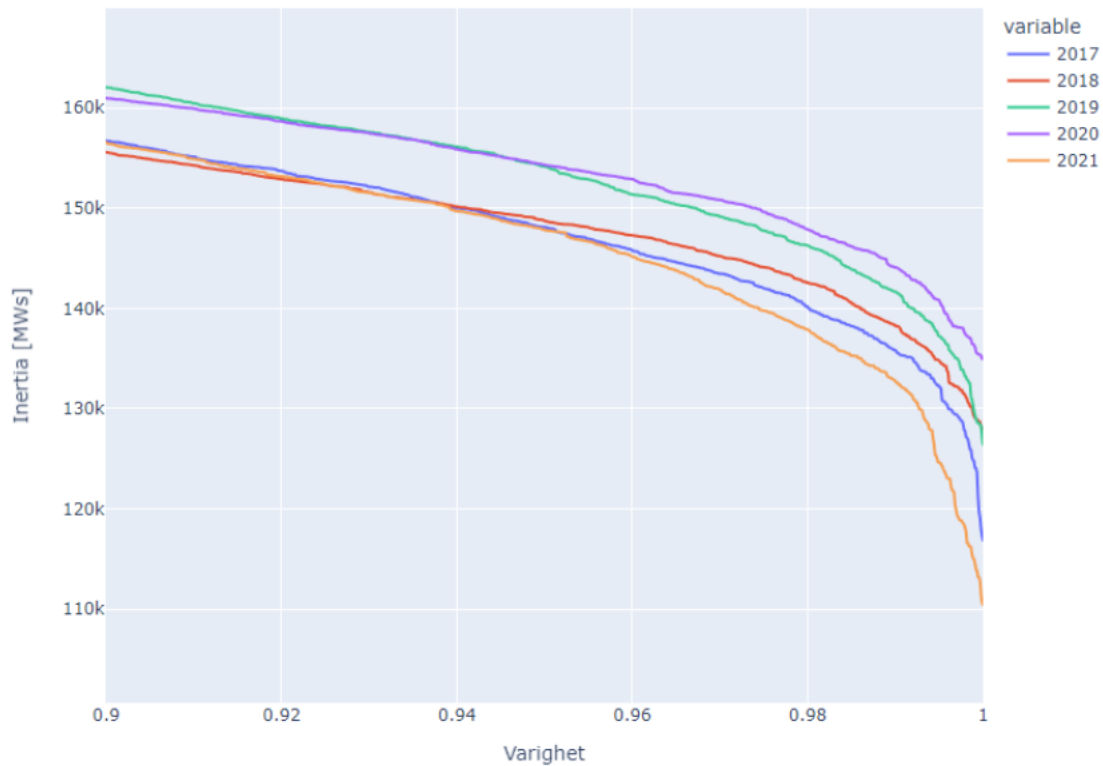
Ved kortvarig FFR må en levere kvalifisert effekt i minst 5,0 sekunder. Etter 5,0 sekunder kan man starte en nedtrapping på maksimalt inntil 20 prosent av kvalifisert effekt per sekund. Det vil si at det tar minst 5,0 sekunder før man er tilbake til nivået før en leverte FFR. Etter dette, må en vente minst 15 sekunder før en starter innhenting, ved å for eksempel lade opp et batteri som har blitt utladet. Ved kortvarig FFR kan man også kun lade inntil 25 prosent av kvalifisert FFR under innhenting. Fra FFR ble utløst skal en, både ved kortvarig og langvarig FFR, være klar til å levere FFR på nytt innen 15 minutter.[11].

2.1.2 FFR marked

Statnett har fra 2022 etablert et marked for FFR. Det innebærer at FFR anskaffes for en spesifisert periode av Statnett som systemansvarlig. Det er viktig for Statnett å ha riktig dimensjonert med reserver klart. Dette har medført at FFR blir delt inn i to type produkter: FFR Profil som sikrer et begrenset volum mellom kl 22 og 07 og hele døgnet i helger gjennom en sesong som er gitt av Statnett og FFR Flex som leveres på bestilling fra Statnett. Antall timer Statnett kan bestille FFR Flex fra leverandør blir avtalt på forhånd. I 2023 var leveranseperioden for FFR Profil uke 21 til og med uke 35, fordelt på 1350 timer. For FFR Flex var leveranseperioden uke 17 til uke 44 fordelt på 400 timer[10].

For å kunne tilby FFR må man levere tilbud til Statnett. Fristen er i god tid før perioden man skal tilgjengeliggjøre FFR, og var i 2023 27.februar. I perioden etter blir det avgjort om tilbudet aksepteres og det blir undersøkt om leverandør er kvalifisert til å levere FFR[10]. Noen av kravene som blir stilt til leverandør er beskrevet i 2.1.1. For hver MW FFR Profil en stilte tilgjengelig for Statnett i 2023 fikk en betalt 150 NOK/MW/time. For FFR Flex var prisen 450 NOK/MW/time [10].

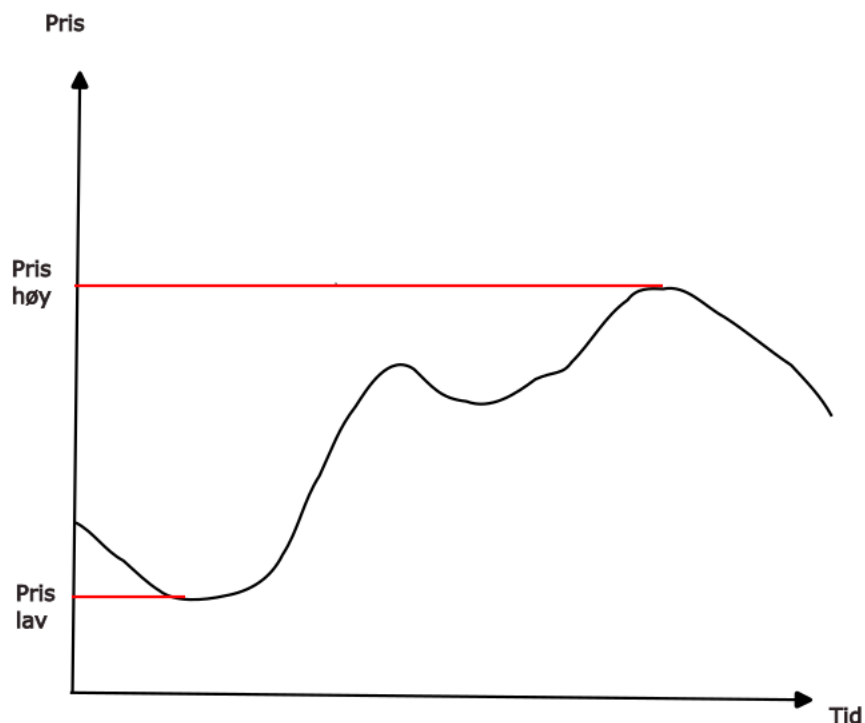
Statnett bruker egne prognoseverktøy for å estimere når det vil være behov for å bestill FFR [10]. I rapporten fra systemansvarlig 2021, blir det pekt på at det i 90 prosent av tiden de siste fem årene har vært et inertia-nivå på over 155 GWs [7]. I figur 5 kan man se at inertianivået ligger ved 162 GWs eller lavere i 10 prosent av tiden. I store deler av denne perioden det blir estimert at behovet for FFR oppstår og dette gir grunnlag for valg av periode hvor Statnett innhenter FFR fra markedet [7]. Som figur 1 viser, så vil dette nivået i stor grad oppstå om sommeren.



Figur 5: Figuren viser laveste inertianivået som ble registrert 10 prosen av tiden i perioden 2017 til 2021. Hentet med tillatelse fra Statnett sin rapport fra systemansvarlig[7].

2.1.3 Kraftpriser

Siden 1990, har elektrisk energi hatt en markedsbasert omsetning etter grunnlaget fra energiloven. Norge er en del av et felle nordisk marked hvor Danmark, Finland, Sverige og Norge er med. Landene har en felles markeds plass som kalles Nord Pool Spot, som ble opprettet i 1993 [12]. Hver dag blir kraftprisen hver time påfølgende dag satt på Nord Pool sin kraftbørs. Kraftprisen måles som regel i kr/kWh eller i EUR/MWh. Kraftprisen er avhengig av tilbud og etterspørsel. Det er veldig mange faktorer som er med på å påvirke tilbud og etterspørsel hvor en veldig viktig faktor er været. Variasjoner i været er med på å gjøre at kraftprisen varierer mye i løpet av et år, men også innad i et døgn. Mer uregulerbar fornybar energi som vind- og solkraft vil forsterke disse variasjonene [13]. I figur 6 kan en se hvordan kraftprisen kan variere gjennom et døgn. Ved å bruke et batterisystem til å kjøpe elektrisk energi når prisen er lav og selge når prisen er høy, kan man utnytte variasjon, eller arbitrasje, i kraftprisen gjennom et døgn.



Figur 6: Figuren illustrerer hvordan kraftprisen kan variere gjennom et døgn.

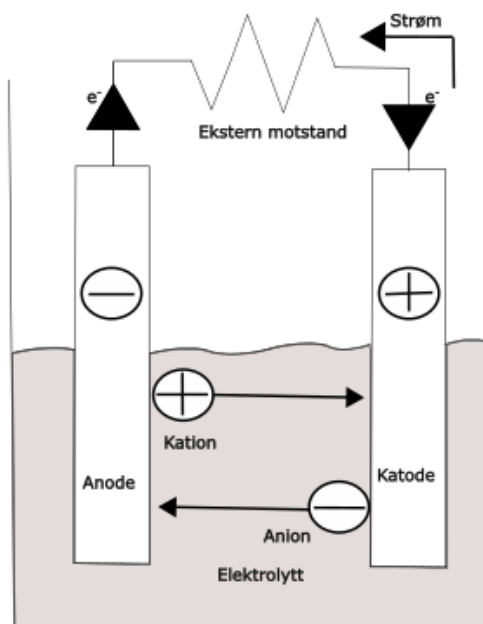
Sluttforbrukeren betaler for mer enn kun kraftprisen, når han eller hun kjøper kraft. I tillegg til kraftprisen, så må en også betale for nettleie og statlige avgifter. De statlige avgiftene er avgifter som staten har bestemt at de skal ha, mens prisen på nettleie er prisen for å frakte den kraften fra der den blir produsert, til der den blir brukt. For 2021 var gjennomsnittsprisen man totalt betalte 1,48 kr/kWh. Av totalen betalte man 0,74 kr/kWh for kun kraften, 0,30 kr/kWh i nettleie og 0,44 kr/kWh i statlige avgifter [14]. Når en kjøper kraft, må en betale alle tre tre leddene, mens når man selger kraft får man kun betalt for selve kraftprisen. Dette sørger for at lønnsomheten ved å kjøpe ved lave kraftpriser og selge ved høye kraftpriser vil bli redusert. Det har tidligere blitt undersøkt mulighet for å utnytte kraftarbitrasje, ved bruk av batterisystem, hvor det har blitt konkludert med at det ikke var lønnsomt i Norge [15].

2.2 Hva er et batteri

Batterier kan brukes til en rekke ulike applikasjoner som transport, energistyring, leker og vertkøy [16] [4]. Batterier har egenskapen at de er fleksible med tanke på lokasjon og har rask installasjonstid [16]. Et batteri består av en eller flere galvaniske celler, og det vil i 2.2.1 bli redegjort for hva en galvanisk celle er.

2.2.1 Galvanisk celle

I figur 7 kan en se en galvanisk celle illustrert. En galvanisk celle har en positiv og en negativ elektrode. Elektrodene er adskilt fra hverandre av en elektrolytt som kan lede ioner fra elektrodene samtidig som elektroner ikke kan flyte fritt. Elektrodene ligger nærme hverandre og vil ha en elektrisk leder koblet mellom seg. Under utladning flyter elektorene fra den negative elektrodene til den positive katoden. Elektroden som elektronene flyter fra, kalles anoden, mens elektroden som mottar elektroner kalles katoden. Merk at strømmen går i motsatt retning av elektronstrømmen. Den elektriske strømmen som oppstår vil sammen med spenningsforskjellen mellom elektrodene gi elektrisk effekt som kan nyttiggjøres [4]. Ved å kombinere flere galvaniske celler, i enten serie eller parallell får man det man kaller et batteri [4].

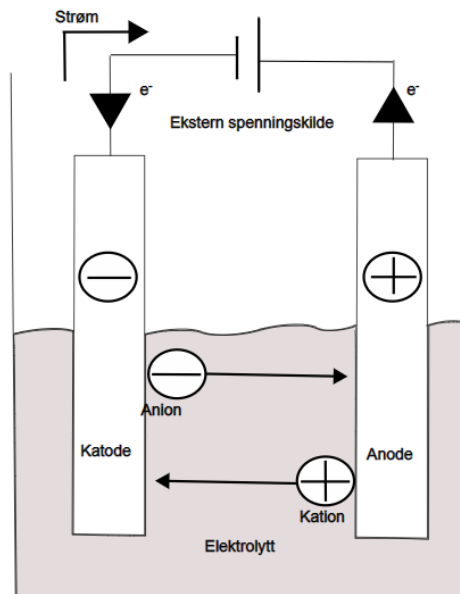


Figur 7: Figuren illustrer hvordan en galvanisk celle operer. Figuren er tegnet med inspirasjon fra Understanding batteries[4].

2.2.2 Elektrolysecelle

Når et batteri er delvis eller helt utladet, kan man lade opp batteriet ved å koble på en ekstern energikilde. Da snur elektronstrømmen og den konveksjonelle strømmen snur. Da lades batteriet opp og vil ved fullading være klar for bruk [4]. I figur 8 kan en se en elektrolysecelle illustrert. Elektrodene i en elektrolysecelle er fortsatt adskilt av en elektrolytt som skal sørge for at ioner fra elektrodene kan flyte fritt. Elektroden som var anode i en galvanisk celle har nå blitt til en katode mens katoden har blitt til anode. Det medfører at det oppstår en elektronstrøm fra høyre til

venstre i figur 8, mens den konvensjonelle strømmen går til høyre [4]. Den påsatte spenningen vil sammen med den elektriske strømmen tilføre cellen energi, som kan brukes på et senere tidspunkt.



Figur 8: Figuren illustrer hvordan en Elektrolysecelle operer. Figuren er tegnet med inspirasjon fra Understanding batteries[4].

2.2.3 Primær- og sekundærbatteri

Batterier deles som regel i to hovedkategorier: Primær- og sekundærbatteri. Primærbatteri lades ut en gang og blir kastet etterpå. Et sekundærbatteri kan etter utladning, lades opp på nytt, for deretter å bli brukt på nytt [4]. I anvendelsene som blir undersøkt i denne oppgaven, er det sekundærbatterier som er relevante.

2.2.4 Kjemien bak

Under utladning av en celle, samler en elektrisk leder elektroner fra en kjemisk reaksjon i anoden. Disse elektorene går gjennom en elektrisk last og videre og blir tatt i mot av en elektrisk leder på den andre siden og ført videre til katoden. De kjemiske reaksjonen som oppstår kan representeres som følgende. På den negative elektroden:



På den positive elektroden blir det seende slik ut:



Materialet M er typisk et metall som blir oksidert. Det betyr at metallet gir fra seg et elektron. Dette fører til at metallet blir positivt ladet og dermed skrives som M^{+} og at man får et fritt elektron e , som er negativt ladet [4].

Elektronet fra anoden kommer til slutt til katoden. Elektronet e vil sammen med et metalloksid X reagere og danne X^- . Typiske katodematerialer er manganoksid (MnO_2), nikkel ($NiOOH$) eller bly (PbO_2). Noen typiske anodematerialer er sink (Zn), kadmium (Cd) og litium (Li) [4]. Det finnes også mange andre anode- og katodematerialer, hvorav noen av de vil bli vist i 2.3.

Den kjemiske reaksjonen som skjer på anoden og katoden kalles en halvreaksjon. En halvreaksjon er en kjemisk reaksjon som beskriver halvparten av en redoksreaksjon i en battericelle. Den ene halvreaksjonen kalles en oksidasjon mens den andre en reduksjon. Hver halvreaksjon har et potensial med en tilhørende spenning. For å finne spenningen til hele cellen summeres spenningen for hver halvreaksjon:

$$E_{cell}^0 = E_{katode}^0 - E_{anode}^0. \quad (3)$$

I likning 3 er E_{katode}^0 standard reduksjonspotensialet for katoden mens E_{anode}^0 er reduksjonspotensialet for anoden som tilsammen i likning 3 cellepotensialet E_{cell}^0 . Ved å sette sammen flere celler i serie kan man oppnå høyere spenning og slik kan et batterisystem oppnå sitt spenningsnivå [5].

2.2.5 Batteriets egenskaper

Et ferdig batteri er komplekst og består av mange komponenter som er designet på et veldig nøyaktig nivå for at det skal fungere optimalt. Hvordan overflatearealet til elektrodene, konduktiviteten til elektrolytten og reaksjonsomgivelsene rundt elektrodene er påvirket hva slags egenskaper som batteriet har [5]. Hvert enkelt batteri har sitt sett med egenskaper. I dette underkapittelet skal egenskaper, relevante for flermålsanalysen som har blitt gjennomført, bli beskrevet.

2.2.6 Kapasitet og effekt

Hvert batteri har en kapasitet. Kapasiteten blir ofte angitt som hvor mange amperetimer (Ah) et batteri kan levere under en gitt utladningsstrøm og temperatur [5]. I denne oppgaven vil tilgjengelig energi i batteriet bli angitt som kapasiteten til batteriet. Enheten for kapasitet til et batteri kan, og vil i denne oppgaven, være oppgitt med enheten wattimer. Tilgjengelig kapasitet til et batteri settes av fabrikken som har laget batteriet. Fabrikken kan velge å sette opp kapasiteten, men det vil kunne gå på bekostning av levetiden til batteriet [4].

Effekten, et batteri kan levere til en last kan bli oppgitt i enheten Joule/sekund eller watt. Størrelsen angir hvor mye energi som blir overført per tidsenhet. I batteriet er det flere faktorer som påvirker batteriets evne til å levere effekt. Blant annet er elektrodeoverflaten i elektrolytten viktig [5] og i et redoks flytbatteri vil antall celler avgjøre effekten batteriet kan levere [5].

2.2.7 Nettokapasitet

Som regel er batterier oppgitt med en kapasitet. På sekundære batterier er det ofte et intervall for hvilke nivåer av SoH (State of Health) som det er anbefalt å holde seg innenfor. Dette gjør at en ender opp med en nettokapasitet, som er den kapasiteten som en i realiteten forholder seg til i vanlig drift. Forskjellige batterier har forskjellige nivåer av nettokapasitet, som gjør at det ikke alltid er batteriet med høyest kapasitet som har den høyeste praktiske kapasiteten. Videre i oppgaven blir DoD (Depth of Discharge) brukt som uttrykk for denne nettokapasiteten.

2.2.8 Degradering og levetid

Et batteri vil over tid miste, noe av sin kapasitet. Dette kalles degradering. Avhengig av bruksområde, vil kapasiteten etterhvert bli så liten at man konkluderer med at batteriet har nådd End of Life (EoL). Ved EoL, så kan det være restkapasitet igjen, men en konkluderer da med at det ikke er nok for bruksområdet det er satt til. Degraderingen er komplekst [5] og det er mange forskjellige årsaker til at degraderingen oppstår, avhengig av hva slags batteri man har [4]. Dannelse av dendritter, irreversible kjemiske reaksjon og slitasje på materiale er noen av disse årsakene [4].

2.2.9 Energitetthet

Energitetthet er hvor mye energi man får plass til per volum. Denne størrelsen måles i denne oppgaven i MWh/m³. For bærbare applikasjoner, som for eksempel mobiltelefon, laptop og øretelefoner, men også elektriske kjøretøy, er det energitetthet en helt avgjørende egenskap til batteriet. For andre applikasjoner, som stasjonære batterisystemer, ment til å regulere kraftsystemet, er denne egenskapen ikke fullt så viktig. Det forskes mye på hvordan man kan forbedre denne egenskapen [3]. Ofte vil egenskapen i stor grad være påvirket av hvilke kjemiske stoffer som blir brukt i batteriet.

2.2.10 Effektivitet

Et batteri utnytter den kjemiske energien lagret i batteriet, for så å omdanne denne energien til elektrisk energi [4]. I motsetning til å utnytte den kjemiske energien i en forbrenningsmotor, hvor maks effektivitet er gitt av Carnot syklusen, utnyttes den kjemiske energien direkte og man kan oppnå teoretiske virkningsgrader på opp mot 100 prosent [5].

2.3 Ulike batteriteknologier

Denne oppgaven skal undersøke og sammenligne ulike batteriteknologier. Det finnes en haug med forskjellige batteriteknologier [16]. Kun de teknologiene som senere er tatt med i flermålsanalysen, vil bli beskrevet under.

2.3.1 Litium-ion batteri

Litium batterier er en batteritype som har eksistert lenge med høy spesifikk energi [4]. Det finnes fire grunnleggende varianter: litiummetall, litium-ion, litumpolymer og fast-elektrolytt litiumbatteri [5]. I denne oppgaven er det litium-ion batteri som er relevant. Litium-ion batterier er det vanligste litiumbatteriet. Den negative elektroden i litium-ion-batterier inneholder en struktur som gir mekanisk støtte og muliggjør binding av litium i ladet tilstand. Dette fører til at litium-ionet ikke blir omdannet til metall og en unngår dannelse av dendritter i batteriet [5]. Dendritter er tre-lignende strukturer som kan dannes på elektrodeoverflatene. Hvis disse strukturene blir lange nok, kan dendrittene forårsake kortslutning som fører til skade på batteriet.

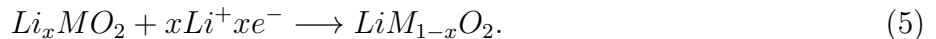
Det finnes flere mulige anodematerialer for litium-ion batterier, men det vanligste materialet er grafitt. Under utladning av et litium-ion batteri, løsner litium fra grafitten som sender Li^+ som transporteres gjennom elektrolytten fra anoden til katoden [5]. Så fort Li^+ når katoden, interkalerer Li^+ med katodematerialet, som for eksempel kan være CoO_2 . Anodematerialet er ofte likt fra ulike litiumbatterier mens katodematerialet varierer [5], og det blir forsket mye på å finne det beste katodematerialet i et litiumbatteri [3].

Halvreaksjonen som oppstår på den negative elektroden er gitt av:

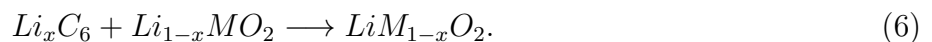


Halvreaksjonen viser at Litiumionet frigjør seg fra grafitten C_6 og man står deretter igjen med et positivt ladet litiumion xLi^+ , hvor x er et antall. For hvert positivt ladet litiumion står man igjen med et fritt negativt ladet elektron e^- , mens grafitten C_6 blir igjen i den negative elektroden [5].

Halvreaksjonen på den positive elektroden er gitt av:

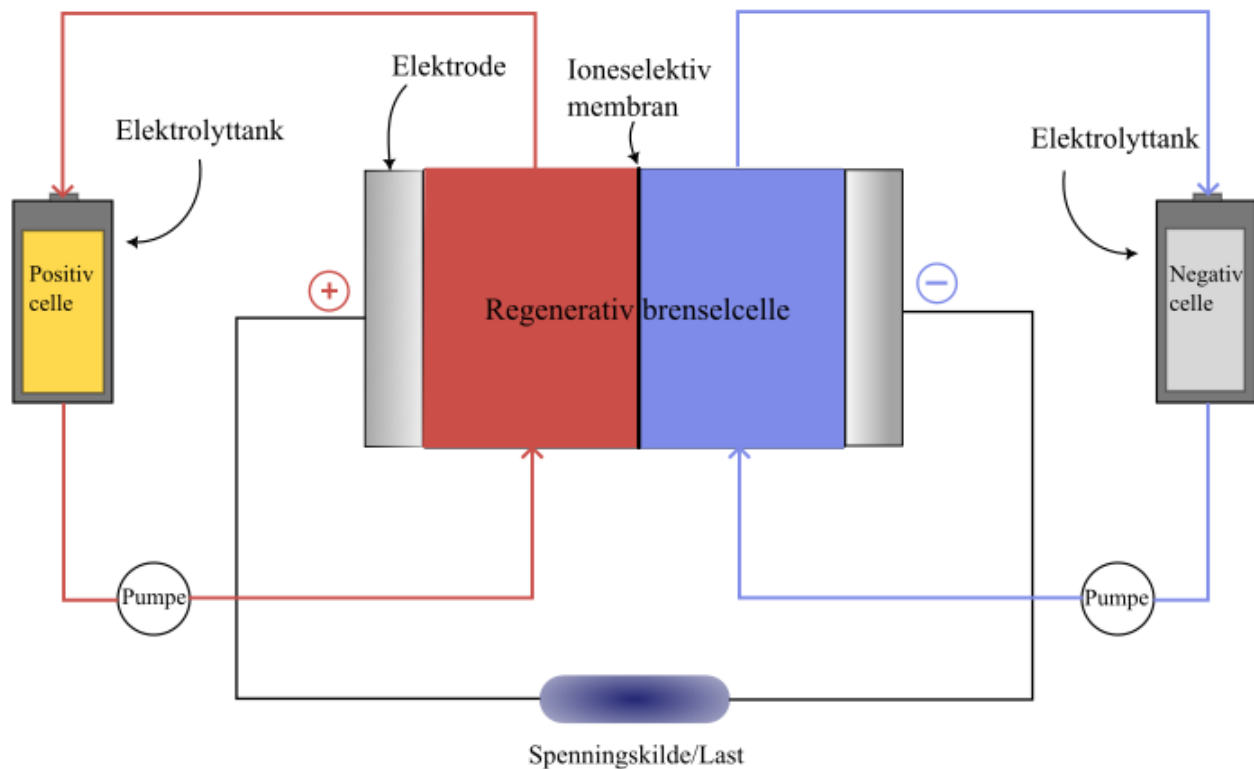


Halvreaksjon på den positive elektroden er ikke like rett frem som på den negative elektroden og vil se litt ulik ut, avhengig av materialet som er brukt til den positive elektroden [5]. Litiumionet og elektronet reagerer med metaloksidet MO_2 , som blir redusert og man står igjen med $LiM_{1-x}O_2$ [5]. Den totale reaksjonen for cellen kan skrive slik:



2.3.2 Vanadium redoks flytbatteri

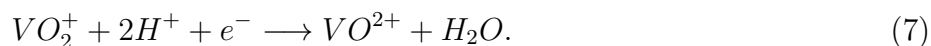
En annen batteritype er redoks flytbatteri. Et flytbatteri er et elektrokjemisk batteri som skiller seg noe ut fra vanlige batterier. En illustrasjon av et vanadium redoks flytbatteri er vist i figur 9.



Figur 9: Figuren illustrer hvordan en celle i et redoks flytbatteri operer. Figuren er tegnet med inspirasjon fra *Current State and Future Prospects for Electrochemical Energy Storage and Conversion Systems* [16]

Et redoks flytbatterisystem består av to eksterne tanker med flytende elektrolytt, koblet til en celle som skiller elektrolyttene med en ioneselektiv membran. Elektrolytten blir pumpet fra elektrolyttanken til cellen, hvor redoksreaksjoner foregår. Redoksreaksjonene gir opphav til elektrisk energi, som ved en galvanisk celle, som kan benyttes på en last. Ved å påføre elektrisk spenning på cella, vil reaksjonene reverseres og konverteres til kjemisk energi. Dette skjer ved lading av batteriet [16].

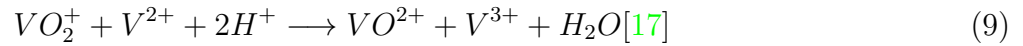
Blant redoks flytbatteriene, er vanadium redoks flytbatteri (VRFB), kanskje det mest lovende batteriet [17]. På den positive siden i cellen i et VRFB kan følgende reaksjon være:



På den den negative siden skjer følgende reaksjon:



Under utladning blir V^{2+} oksidert til V^{3+} på den negative siden og VO_2^+ blir redusert til VO^{2+} . Cellepotensialet for halvreaksjonene i likningene 7 og 8 er 1,26 V [17]. Under lading av VRFB, vil halvreaksjonene i 7 og 8 gå mot venstre og den reverse reaksjonen oppstår. Den totale reaksjonen under utladning kan skrives slik:



2.3.3 Saltvannsbatteri

Saltvannsbatterier er den siste batteriteknologien, som er inkludert i denne oppgaven. En stor fordel med batteriet er at materialene i batteriet er regnet å være enkelt tilgjengelig i stor skala. [18].

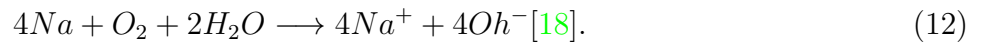
En saltvannscelle fungerer akkurat som en galvanisk celle. På den negative elektroden kan halvreaksjonen skrives som:



Natriumionet Na^+ reagerer sammen med elektronet e^- og danner Na [18]. På den positive elektroden oppstår halvreaksjonen:



2 Oksygenmolekyler O_2 reagerer med to vannmolekyler H_2O og fire elektroner e^- og danner 4 OH^- . Halvreaksjonene 10 og 11 gir cellespenningen 3,48 V og gir en totalreaksjon som kan skrives som følgende:



Ved lading av cellen vil reaksjonene reverseres og likningene vil gå mot venstre [18].

2.4 Flermålsanalyse

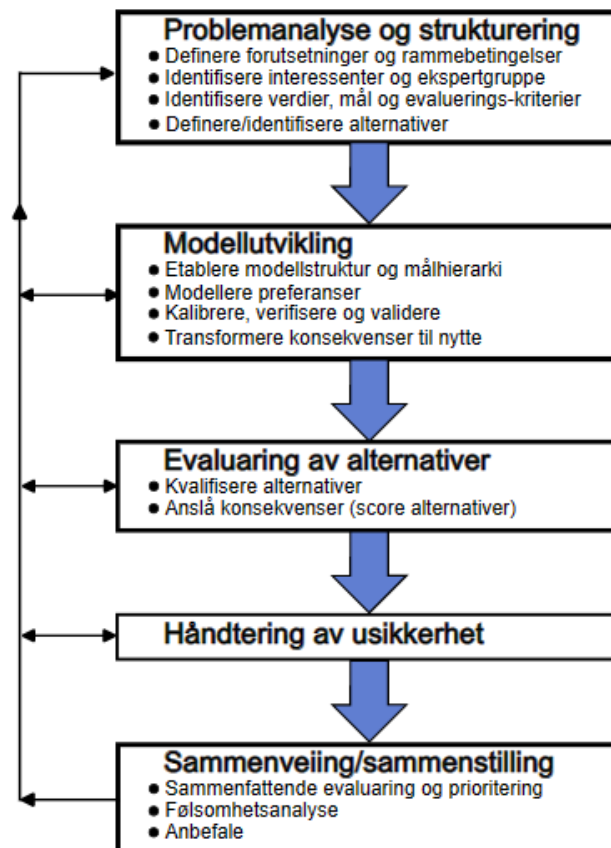
Når en skal løse et problem, som å levere systemtjenester for å balansere kraftsystemet og utnytte kraftarbitrasje, har man som regel flere alternativer til å løse problemet. For å vurdere disse alternativene opp mot hverandre, bruker man ofte flere kriterier, som i mange tilfeller er motstridende. For eksempel vil det være en fordel med et batteri med stor energilagringkapasitet, men det vil ofte medføre et batteri som tar stor plass og er tungt som kan være negativt.

Det finnes ofte mye informasjon når man skal foreta et valg i en beslutningssituasjon. Men mye informasjon gjør det ikke nødvendigvis enklere å gjøre gode valg. Et verktøy man kan bruke for å sammenligne alternative løsninger opp mot hverandre, er flermålsanalyse. Flermålsanalyse er kjent under det engelske akronymet MCDA (Multi-Criteria Decision Analysis) [19]. En flermålsanalyse er et nyttig verktøy å ta i bruk i tilfeller hvor det finnes veldig mye relevant informasjon.

En flermålsanalyse blir generelt definert som

en hvilken som helst fremgangsmåte som evaluerer en liste med alternativer opp mot et sett med vurderingskriterier, med det formål om å kåre en vinner eller rangere alternativene [19].

Det finnes flere måter å gjennomføre en flermålsanalyse på, men innholdet er ofte likt og er illustrert i figur 10.



Figur 10: Figuren viser de ulike stegene som normalt inngår i en flermålsanalyse. Tegnet med inspirasjon fra Flermålsanalyser i store statlige investeringsprosjekt [19].

Selv om de ulike delene kommer i en kronologisk rekkefølge, så går en gjennom hvert steg iterativt. Det betyr at en går innom de ulike stegene flere ganger i løpet av prosessen med å gjennomføre en flermålsanalyse. En godt gjennomført flermålsanalyse er betinget av at en går gjennom de ulike stegene i analysen nøye [19].

2.4.1 Problemanalyse og strukturering

Det første steget i en flermålsanalyse er å definere problemet man skal løse så presist en klarer. Behovet for å definere problemet man skal løse, øker med graden av kompleksiteten til problemet [19].

For å klart kunne definere problemet som skal løses er det avgjørende å kartlegge beslutningskonteksten. Løsningen på problemet vil i mange tilfeller bli igangsatt flere år frem i tid og vil pågå flere år frem i tiden. For eksempel kan behovet for fleksibilitet i kraftsystemet, være høyere i fremtiden enn i dag. Innen avgjørelsen for valg av løsning er fattet, installert og satt i drift har behovet endret seg. Dermed må man itillegg til å kartlegge nå-situasjon, kartlegge hvordan ytre omstendigheter og faktorer vil utvikle seg fremover i tid. Under dette trinnet i flermålsanalysen er det også naturlig å komme med forutsetninger som har blitt gjort.

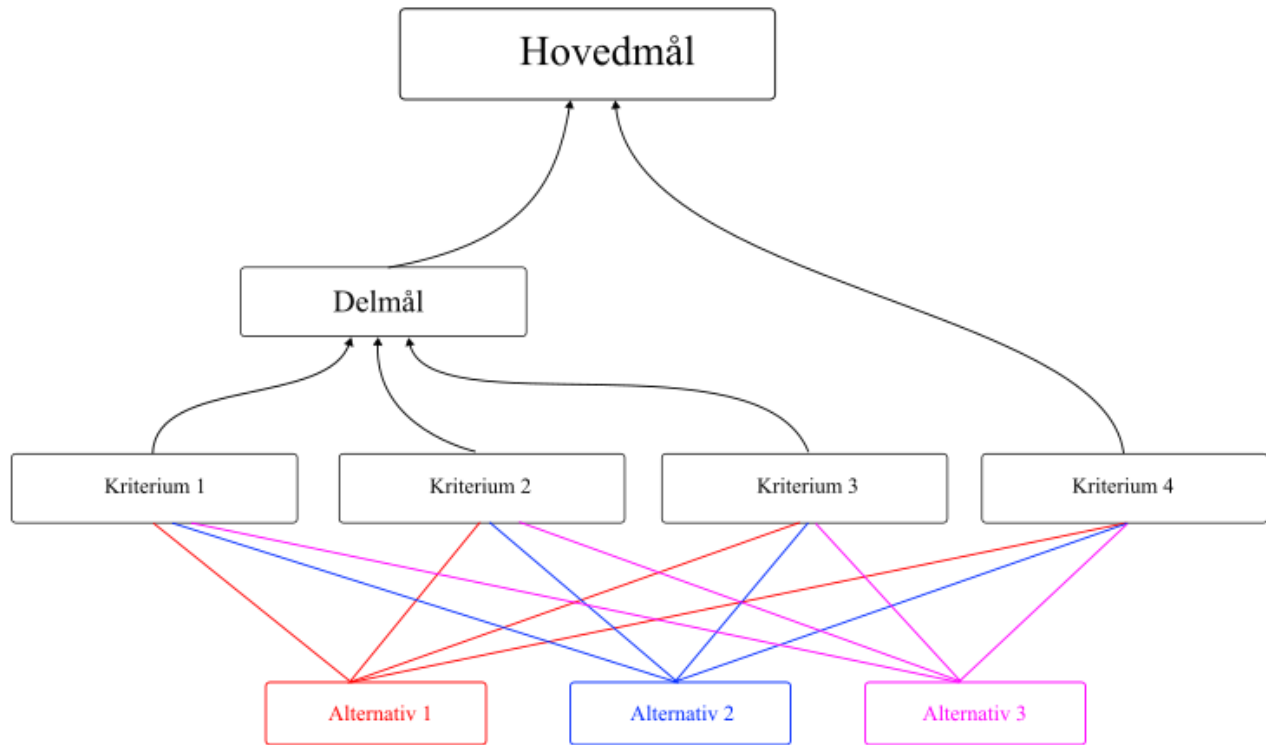
Det neste steget er å identifisere interessenter og ekspertgruppe. Det bør tidlig identifiseres hvem som interessenter til beslutningsproblemet og hvordan interessentene skal involveres i beslutningsproblemet. Interessenter bør involveres slik at de kan komme med sine synspunkter, selv om de ikke direkte er med å ta avgjørelse i beslutningsprosessen. Ekspertgruppen er gruppen som har fått ett mandat for å danne et grunnlag for å finne beste løsning samt komme med en anbefalt løsning [19].

Når en har identifisert interessenter og satt ekspertgruppe, er neste steg å identifisere verdier, mål og evalueringskriterier. Når de ulike alternativene skal måles opp mot hverandre, brukes ulike evalueringskriterier, som for eksempel pris, klimavennlighet, levetid etc. Evalueringskriterierene påvirker delmål og mål som avgjør hvilke alternativer som kommer best ut av analysen. Disse skal alternativene, som man finner i neste steg, bli målt på. Hvordan de blir målt på de ulike kriteriene avgjør hvem som i størst grad lykkes i målet og blir rangert som best alternativ [19].

Etter at stegene over er gjennomført, er siste steg i problemanalysen og struktureringen å identifisere alternativer. Da skal man finne ulike alternativer for å løse problemet definert i problemstruktureringprosessen. Det er ingen fasit på hvordan denne prosessen skal gjennomføres, men ekspertgruppen kan benytte seg metoder som idégenerering med gule lapper eller SWOT-analyse (Strength, weakness, opportunities og threats) [19].

2.4.2 Modellutvikling

Etter å ha gjennomført problemanalysen og strukturering, er det på tide å utvikle modellen som skal brukes i flermålsanalysen. Da er det naturlig å etablere en modellstruktur med mål, delmål, kriterier og alternativer i et målhierarki, som illustrert i figur 11.



Figur 11: Figuren viser hvordan mål, delmål, kriterier og alternativer står i forhold til hverandre i en flermålsanalyse. Tegnet med inspirasjon fra *Flermålsanalyser i store statlige investeringsprosjekt* [19].

Kriteriene blir brukt for å bedømme hvordan de ulike alternativene tilfredstiller delmål og hovedmålet. Hovedmålet, blir formulert utifra problemanalysen og strukturering. Selve modellutviklingen er sentral i flermålsanalyse og kan for beslutningstakere være vel så interessant som selve rangeringene av alternativene som foreligger etter at analysen er gjennomført. Hensikten med modellen er at den skal være til hjelp for beslutningstakere. Av dette følger at modellen bør ha så få kriterier som mulig. Dette innebærer at kriterier som ikke veies nok til å løfte et alternativ over et annet, eller kriterier hvor alternativer scorer likt, anbefales å bli ekskludert. Dette står i motsetning til å gjøre modellen komplett og kan i verste fall gjøre at egenskaper som er viktige, som ikke blir vurdert viktig av aktøren som utvikler modellen, kan bli ekskludert [19].

For hvert enkelt evalueringskriterie, velger man et intervall som de ulike alternativene kan få en score i. For eksempel kan hvert kriterie måles fra 1 til 10 og alternativene får henholdsvis en score mellom 1 til 10. For eksempel vil et alternativ som er dyrt få en score på 3 mens et alternativ som er rimeligere kan få en score 8. Noen evalueringskriterier er kvantitative, mens andre evalueringskriterier er kvalitative og en må bruke skjønn for å sette en hensiktsmessig score.

Det er viktig å ha en grunnleggende forståelse for informasjonen som ligger bak disse scorene. Selv om scorene som regel angis i tall, regnes ikke scorene som numeriske. For eksempel vil ikke en score på fire være dobbelt så bra som en score på to, eller score på tre kan ikke regnes som halvparten så bra som en score seks. Slike scorer regnes som kardinale verdier. Kardinale verdier kan rangeres, men ikke forstås direkte på samme måte som numeriske verdier.[19].

Når modellstruktur og målhierarki er satt, er neste steg å belyse og modellere preferanser. Hvor stor

er konsekvensen av prisen til alternativene? Hvordan veies prisen mot levetiden eller miljøavtrykket til alternativene? En måte å gjøre dette på er å gi de ulike kriteriene vekt. Det kan være utfordrende å sette objektivt helt riktige vekter på kriteriene, men det er det viktigste steget i en flermålsanalyse, gitt at beslutningsproblemet er presist formulert [19].

For beslutningstakere er det ikke bare selve vektingen og scorerer for de forskjellige kriteriene som er viktig, men argumentasjon for verdiene en har kommet frem til. En bør ifølge Flermålsanalyser i store statlige investeringprosjekt etterstrebe preferanseuvehengighet. Det innebærer at bytteforholdet mellom to kriterier er uavhengig av scoren på de andre kriteriene. For at dette skal være oppnådd, så skal variasjon i verdi av kriteriet B, mens A er konstant, være uavhengig av verdien til A [19].

Scorene og vektingen av scorene skal på et tidspunkt transformeres til nytte. Dette er vanlig å gjøre når alternativene skal evalueres. Det finnes flere måter gjøre dette på. En måte er å omsette scorene til ulike alternativer om til nytteverdi ved å benytte en nyttefunksjon [19]. En annen, litt uortodoks, måte å omsette scorerer til nytte er å kreve større endringer på et kriterie for å endre scoren til et kriterie. For eksempel gir en endring i batterilevetid på 5 år til 10 år en større endring i nytte enn en endring i levetid fra 35 år til 40 år. Ved å kreve en større endring i levetid når levetiden er høy, får en sørget for at scorene i seg selv omsettes til nytte.

Når modellen er etablert med tilhørende, alternativer, kriterier, delmål, mål og vekting av kriterier er siste steg i modellutviklingen å kalibrere, verifisere og validere, som illustrert i figur 11. Denne prosessen gjøres fortrinnsvis før evaluering av alternativene. Her blir rimeligheten av modellen undersøkt. Økonomikriteriet er ofte godt egnet til å evaluere kriterier opp mot [19]. Gir det mening at en endring i effekt på 50 kW til et batterisystem tilsvarer en endring på 40 000 kr? Eller bør en slik endring være mindre eller mer verdt?

2.4.3 Evaluering av alternativer

Når en er ferdig med modellutviklingen er det klart for å kvalifisere alternativene som har kommet frem under 2.4.1. Er alternativene fortsatt relevante, nå som evalueringskriteriene er satt? Er det klare krav som er satt, som noen av alternativene ikke oppfyller? I denne prosessen vil ofte enkelte alternativer bli fjernet fra analysen, da det ikke er hensiktsmessig å bruke mer tid på disse [19].

Videre skal det fastsettes nivåer for scorerer på evalueringskriteriene. En starter da med det høyeste prioriterte kriteriet og jobber seg nedover mot det minst viktigste kriteriet. Under denne prosessen kan det oppdages nye alternativer, som illustrerer at flermålsanalyse er en iterativ prosess hvor en går gjennom flere av stegene i figur 10 flere ganger [19]. Når en er ferdig med å estimere nivåer på alternativenes scorerer til de ulike evalueringskriteriene, blir resultatet fremstilt i en konsekvensmatrise. Dette er sluttproduktet av alle stegene så langt i fremålsanalysen og det som gjenstår er håndtering av usikkerhet og sammenstilling.

2.4.4 Håndtering av usikkerhet

En ting som er helt sikkert, er at fremtiden er usikker. En godt gjennomført flermålsanalyse kommer ikke unna en god håndtering av usikkerhet. En vanlig måte å dele inn usikkerhet på er systematisk og usystematisk usikkerhet. Usystematisk usikkerhet er spesifikke forhold som vil kunne inntreffe uavhengig av utviklingen til samfunnet, økonomien og andre prosjekter forøvrig [20]. Usikkerheten til mange egenskaper til et batterisystem vil være av en slik art. Batterisystemets effektivitet eller miljøpåvirkning vil bli lite påvirket av strømkriser eller resesjoner som skulle oppstå i samfunnet.

Systematisk usikkerhet er forhold som vil kunne påvirkes i endring i konjekturen. Jo mer forholdet er følsomme for endringer i konjekturen, jo større er den systematiske usikkerhet [20]. Forhold som uventete mengder uregulerbar kraftproduksjon, store variasjoner i kraftetterspørsel eller ny teknologi som er mer effektiv enn dagens teknologi, vil kunne bidra til et batterisystem som vil være mer eller mindre lønnsomt.

2.4.5 Sammenveining/sammenstilling

Etter at modellen er utviklet og alternativene er evaluert og rangert, skal det gjøres en helhetlig vurdering som til slutt resulterer i en anbefaling av løsning. Når forskjellene mellom alternativene, i sær grad de som ender på topp av rangering, er små er det ikke sikkert man har grunnlag for å si at det ene alternativet er bedre enn det andre. Da kan begge alternativene være akseptable for beslutningstaker [19].

For å evaluere rangeringen, bør robustheten til rangeringen undersøkes. Ved å gjøre en følsomhetsanalyse, kan en få et grunnlag for å forstå hvor store endringer som skal til for at et alternativ skal løftes forbi det ledende alternativet i analysen. Hvis endringen som skal til antas å være urimelig, så gjøres ingen endring i rangeringen og rangeringen er endelig. Hvis endringen som skal til anses som mulig, bør hele evalueringen gjennomgås på nytt [19]. Når alle steg beskrevet i dette delkapittelet om flermålsanalyse er gjennomført, kan ekspertgruppen komme med en anbefaling, med beslutningsgrunnlag vedlagt, til beslutningstaker [19].

2.5 Viktige parametere og begreper

Tidligere i teorien har batteriets egenskaper, relevant for analysen, blitt beskrevet. Det finnes en del andre egenskaper og parametere som er viktige, når det kommer til valg av batteri, som ikke er direkte gitt av fysikken og kjemiens lover og regler. Disse egenskapene blir følgelig beskrevet under.

2.5.1 Pris

En egenskap, som ikke er bestemt av fysikken lover og regler, men som for mange situasjoner er den viktigste egenskapen, er prisen til et batteri. Batteriet består av, som nevnt tidligere, av veldig mange komponenter. Enkelte batterier bruker materialer som er sjeldne og relativt dyre, mens andre batterier trenger krevende behandling for å bli satt sammen. For modne teknologier som Litium-ion batterier og blybatterier, har man klart å få prisen mye ned, mens det for mer umodne teknologier, ligger mye læringspotensial i å få prisen ned.

2.5.2 Lagerkostnad

Batterisystemet som skal brukes må stå et sted. Det er forbundet med en kostnad. Som regel må en regne med å betale for plassen en bruker. Hvis en, av en eller annen grunn, har tilgang på lagerplass uten å betale for dette, så vil det finnes et alternativ til å ha batterisystem på den aktuelle plassen. Dette medfører en alternativkostnad som er viktig å ta med seg når man skal fatte en beslutning.

2.5.3 Netto nåverdi

For å kunne regne ut om en investering er lønnsom, kan et nyttig verktøy være netto nåverdimetoden (NNV), på engelsk kjent som Net Present Value (NPV) [21]. Ved en investeringsmulighet, vil mange av kontantstrømmene, særlig inntektene, komme langt frem i tid. Disse kontantstrømmene må diskonteres til nåverdi, slik at en sammenligner likt. Kontantstrømmene diskonteres med en diskonteringsrente. Utregningen av NNV kan skrives som følgende:

$$NNV = -I_0 + \sum_{t=1}^T \frac{x_t}{(1+r)^t}. \quad (13)$$

x_t er den positive kontantstrømmen, også referert til som terminalleddet, fra hvert enkelt år, t er året hvert enkelt år og blir brukt som indeks, r er diskonteringsrenten, T er den totale perioden for investeringsanalysen og I_0 er investeringsutgiften man må ut med, med engang [21]. I PwC og Forening for finansfag Norge (FFN) sin rapport om risikopremie i det norske markedet, svarer medianen til 140 av FFN sine medlemmer at 2,0 % bør benyttes som vekstrate i terminalleddet i nåverdimodellen [22].

Diskonteringsrenten, eller avkastningskrav, er ofte vanskelig å sette. I PwC og FFN sin rapport om risikopremie svarer 50 % av deltakerene i undersøkelsen at 10-årig statsobligasjon bør benyttes som risikofri rente som avkastningskrav [22]. 10-årig statsobligasjon var i 9.mai 2023 3,2 %, men har variert mellom 0,28 % og 13,01 % de siste 25 årene [23]. Itillegg må en ha et risikotillegg. Ny og usikker teknologi eller kontantstrømmer som kommer langt frem i tid medfører en høyere risiko som krever en høyere diskonteringsrente. Hvor stor grad av systematisk og usystematisk usikkerhet, som beskrevet i delkapittelet i teorien om håndtering usikkerhet, vil også påvirke diskonteringsrenten som settes for en investering.

2.5.4 Miljøkonsekvenser

Batterier krever i flere tilfeller kjemiske stoffer som medfører negative miljøkonsekvenser. Disse kan det være vanskelig å vurdere, siden det er mange forskjellige aktører som til sammen er ansvarlig for hver sin komponent til et ferdig batteri. En viktig miljøkonsekvens, som en ønsker å unngå, for batterier er CO₂-utslipp. Alt annet likt, ønsker man å velge et batterisystem med lavest mulig CO₂-utslipp. Finansdepartementet utgir prisbaner for karbonpris, som kan brukes for å vurdere verdien av klimagassutslipp. For ikke-kvotepliktig utslipp skal prisen være den generelle satsen i CO₂-utslipp for mineralske produkter. I 2023 var prisen 952 kr per tonn CO₂ [24]. Deretter skal prisen øke gradvis til 2000 kr i 2030, som er signalisert i klimaplanen 2021-2030 [1].

3 Metode

I denne oppgaven har det blitt gjennomført en flermålsanalyse. Flermålsanalysen har blitt gjennomført med utgangspunkt i figur 10.

3.1 Problemanalyse og strukturering

Det norske kraftsystemet har blitt redegjort for i delkapittel 2.1. Der har det blitt beskrevet hvordan kraftsystemet hele tiden må balanseres for å sørge for å holde frekvens på 50 Hz. Stadig utbygging av uregulerbar fornybar energi som heller ikke bidrar med treghet til kraftsystemet, skaper et fremtidig behov for fleksibilitet. Derfor var hovedmålet som skulle løses å balansere kraftsystemet til det norske kraftsystemet. For å oppnå dette hovedmålet skulle ulike batterisystemer vurderes opp mot hverandre. Delmålene som skulle nås for å nå hovedmålet om å balansere kraftsystemet var at batterisystemet skal kunne levere FFR til Statnett og utnytte kraftarbitrasje som oppstår i kraftsystemet, beskrevet i delkapittel 2.1.3.

Beslutningstakeren vil være den som investerer i et eventuelt batterisystem som skal balansere det norske kraftsystemet. Til et slikt beslutningsproblem, vil Statnett være en interessepart. Statnett, som er ansvarlig å holde kraftsystemet i balanse, vil være interessert i å kjøpe FFR fra leverandør til en tilbudt pris som ligger under fastsatt pris fastsatt i budrunden som Statnett har før FFR-sesong. Alle som bruker kraft fra det norske kraftsystemet vil også være en interessegruppe da det kraftsystemet kan bli mer stabilt og pålitelig. Ved at et batterisystem utnytter kraftarbitrasje, kan det over tid føre til at prisvariasjon minsker i størrelse, som også vil være en fordel for alle som bruker kraft fra det norske kraftsystemet [13]. Ingen av interessegruppene har blitt vurdert til å skulle ha meninger som kunne påvirke hvordan flermålsanalysen ble utført.

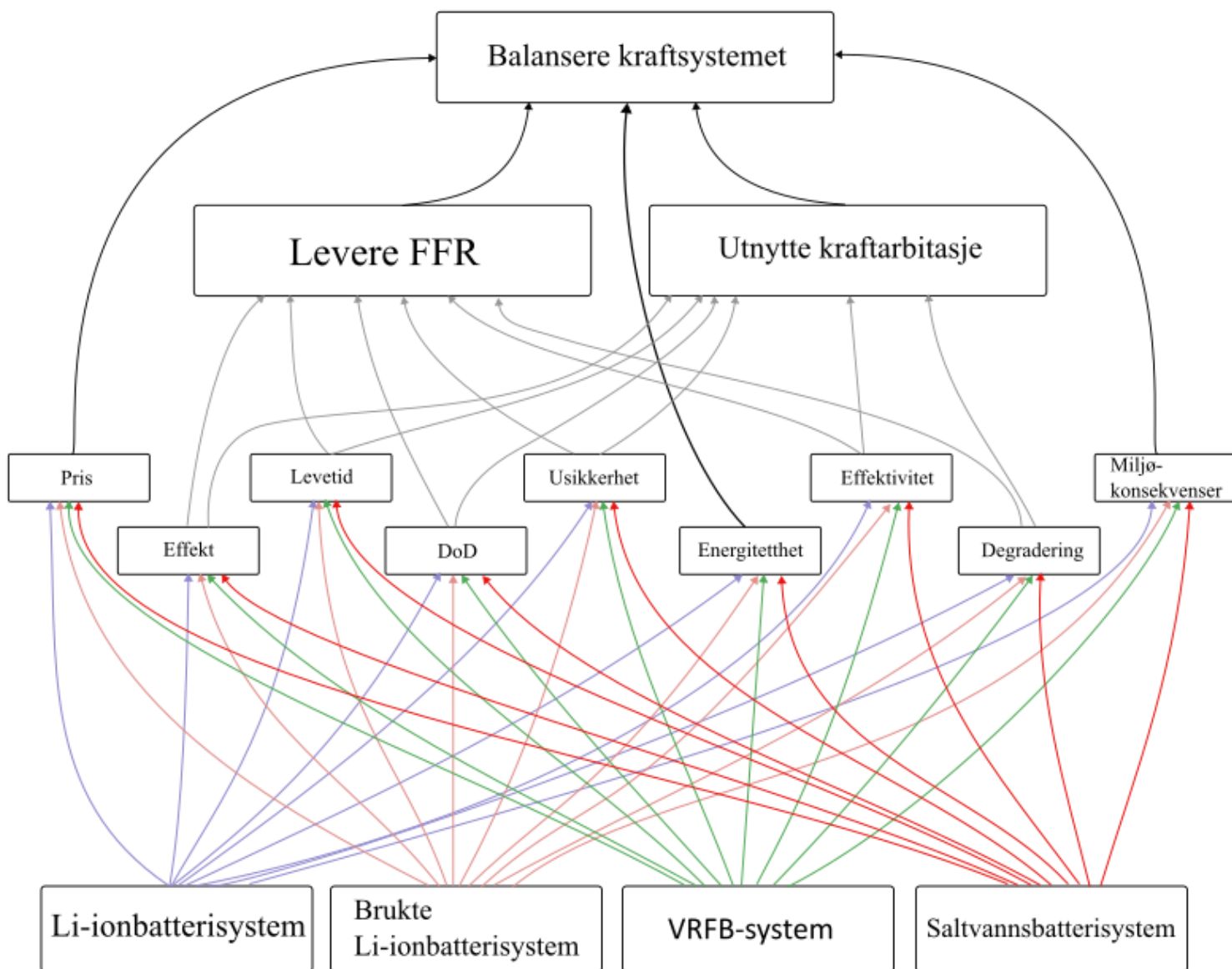
Ekspertgruppen som har gjennomført flermålsanalysen, var undertegnede. Jeg har også gitt meg selv mandatet til å gjennomføre en slik flermålsanalyse.

Hovedmålet til flermålsanalysen var å prøve å finne best mulig løsning for å balansere det norske kraftsystemet. Delmålene som skulle løse hovedmålet var levering av FFR og utnytting av kraftarbitrasje. Kriteriene som alternativene har blitt evaluert etter var pris/kapasitet, effekt, levetid, tilgjengelig DoD, volum per kapasitet, effektivitet, degradering, usikkerhet og miljøkonsekvenser.

For å finne alternativer til å balansere det norske kraftsystemet, har det blitt lett etter kommersielt tilgjengelige batterisystem på internett gjennom utallige ulike internett søk. Det har ikke lyktes å finne batterisystem som har hatt tilstrekkelig informasjon til å ha blitt tatt med i flermålsanalysen. Det ble i prosessen, med å lete etter kommersielle batterisystemer på internett, oppdaget en rapport fra Sintef som hadde sammenlignet fire forskjellige batterisystem til et prosjekt ved Tiller videregående skole [25]. De fire teknologialternativene som Sintef har vurdert i sin rapport og har vært alternativene inkludert i denne oppgaven var: 1) Li-ionbatterisystem, 2) brukte Li-ionbatterisystem, 3) VRFB-system og 4) saltvannsbatterisystem med Na-sulfat elektrolytt [25].

3.2 Modellutvikling

For å lage modellen som skal brukes for å nå hovedmålet, har et målhierki for hovedmålet, delmål, kriterier og alternativene blitt etablert som illustrert i figur 12.



Figur 12: Figuren viser hvordan hovedmålet om balansering av kraftsystemet, delmålene om levering FFR og utnyttning av kraftarbitasje, de valgte evalueringkriteriene og alternativer sto i forhold til hverandre i denne flermålsanalyse.

Alternativene i analysen kunne få en score på de ulike evalueringkriteriene på mellom 1 til 20. Siden li-ionbatterisystem ble vurdert som den mest etablerte og ledende teknologiløsningen ble alternativet vurdert som en baseline som ga grunnlag for å lage en modell. For å oppnå en endring i score, ble en fastsatt endring i NNV, fra likning 13, satt for hvert enkelt kriterie. Det ble utviklet en modell i Python, som er lagt ved denne oppgaven som vist i vedlegg B, hvor det ble estimert hvordan ulike kriterier og ulike scorer til kriteriene påvirket NNV. Utgangspunktet for beregningene,

gjort i modellen, er de forhåndsestimerte egenskapene til Li-ionbatterisystemet. Da alternativene ble evaluert, ble estimatet av egenskapene til Li-ionbatterisystemet justert noe, ettersom grunnlaget for å estimere verdier for alternativene ble bedre utover i prosessen med å gjennomføre denne flermålsanalysen.

3.3 Evaluering av alternativene

For å evaluere de ulike alternativene ble tabell 10 og 11 benyttet. For å estimere verdier, ble Sintef sin evalueringsrapport og deres vurdering lagt til grunn [25]. Sintef har håndtert usikkerhet forskjellig fra denne oppgaven, som ga utslag i noen estimert verdier. De egenskapene som ikke var beskrevet av rapporten, ble antatt ved å tolke hva litteraturen og andre datablad kunne gi av svar. En kort redegjøring av verdier for de ulike alternativene er lagt ved i vedlegg A.

3.4 Håndtering av usikkerhet

Ved å investere i et batterisystem, eksponeres en for både systematisk og usystematisk usikkerhet. Den systematiske usikkerheten ble antatt å være lik for alle alternativene. Den usystematiske usikkerheten ble antatt å være forskjellig. Ulik grad av usystematisk usikkerhet medførte i denne flermålsanalysen til at ulik diskonteringsrente for hvert batterisystem ble satt. Denne diskonteringsrenten skulle representere all usikkerhet knyttet til valg det aktuelle alternativet. Usikkerhet ble satt som et eget evalueringskriteriet i modellutviklingen. En kan se i resultatdelen hvordan variasjon i usikkerhet påvirket NNV.

3.5 Sammenstilling

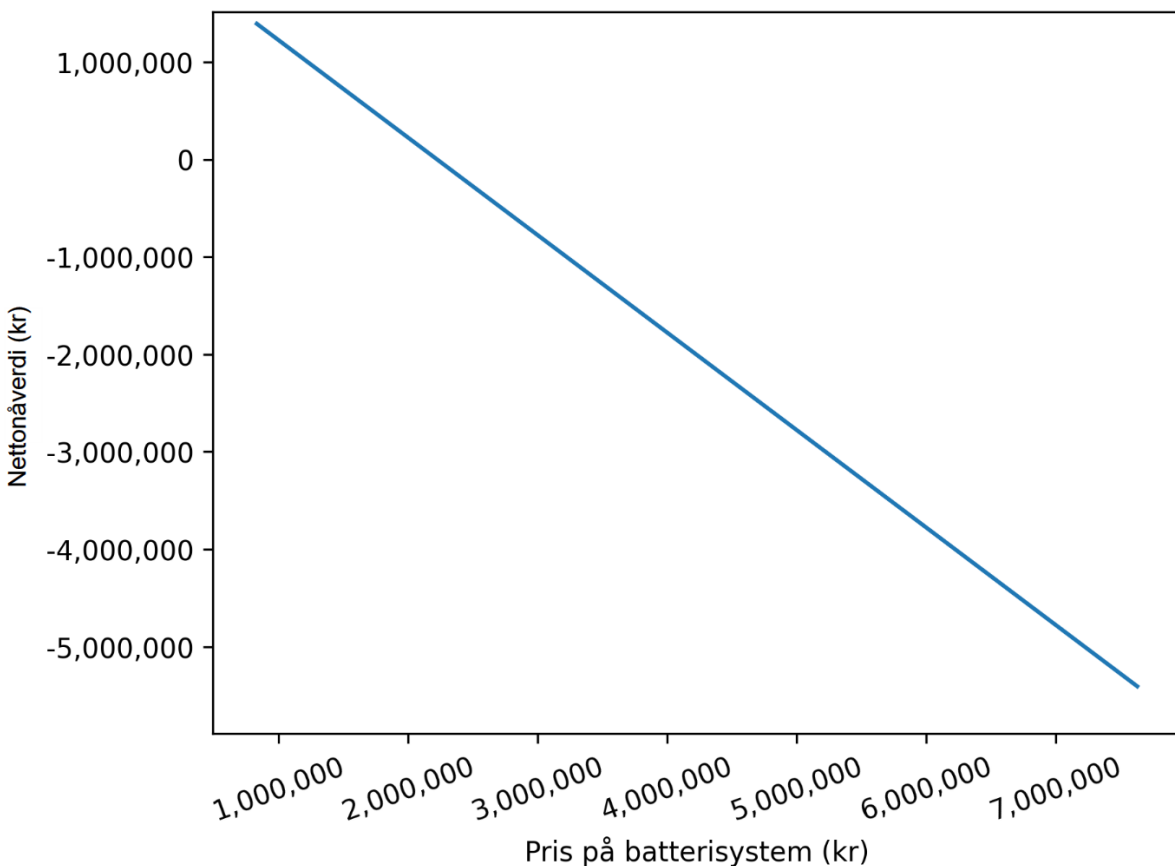
Da problemanalyse og strukturering, modellutvikling, håndtering av usikkerhet og evaluering av kriteriene var gjennomført, ble en helhetlig vurdering av resultatene gjennomført. Vurderingene som ble tatt, kommer til uttrykt i diskusjonen. Anbefaling av beste batterisystem til balansering av det norske kraftsystemet, er gitt i konklusjon.

4 Resultat

I denne delen vil resultatene til flermålsanalysen bli presentert. Først vil hvordan evalueringskriteriene påvirket NNV bli vist i delkapittel 4.1. Dette ga grunnlag for å lage tabeller som viste hvordan ulike verdier ga ulik score. Disse resultatene ga tilsammen et grunnlag for å lage en modell uttrykt i tabell 10 og 11. Disse tabellene ble brukt for å sammenligne de fire batterisystemene i delkapittel 4.2. I delkapittel 4.2 blir verdiene til evalueringskriteriene vist og oversatt til scorer og evaluert i tabell 13.

4.1 Modellutvikling

Figur 13 viser at NNV sank med økt pris på batterisystemet. Av dataen som ble brukt i figur 13, ble det identifisert ulike verdier for pris, som førte til en fastsatt endring i NNV på 400 000 kr. Dette førte til tabell 1.



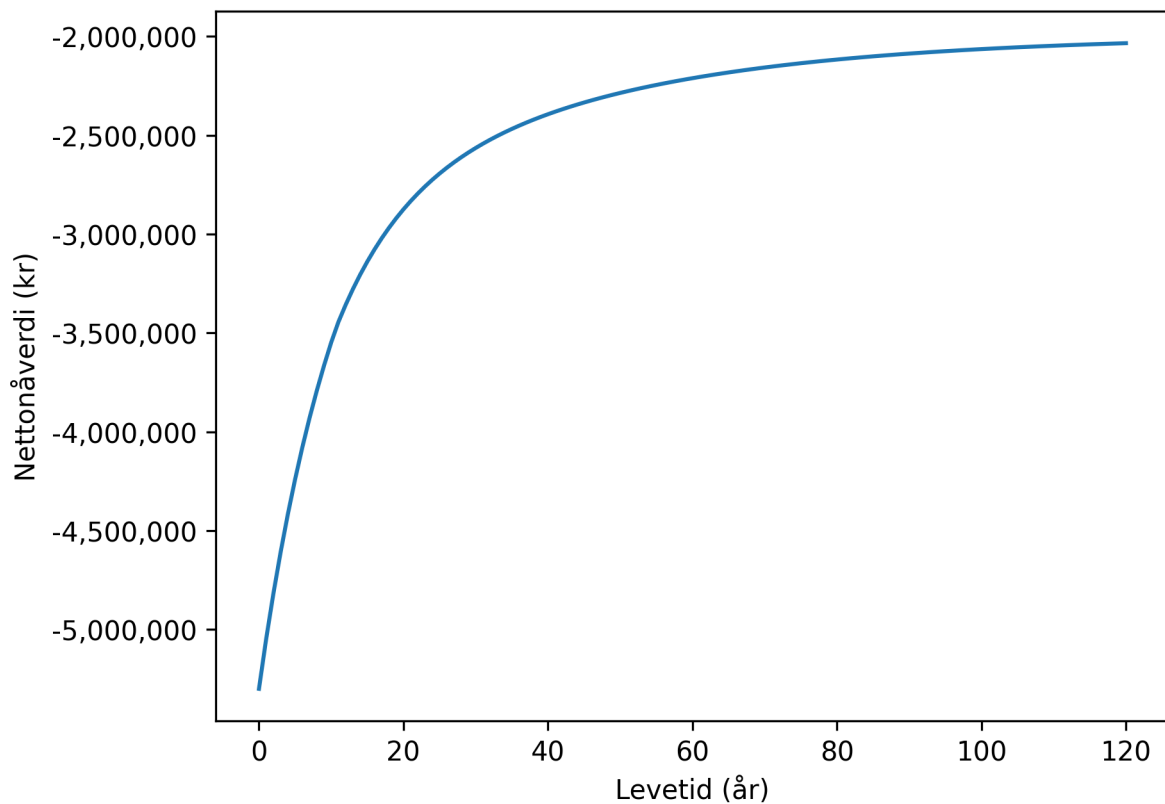
Figur 13: Figuren viser hvordan estimert NNV endret seg med endring av prisen til et batterisystem.

Tabell 1: Tabellen viser hvordan endring i pris påvirket scoren som har blitt oppnådd.

Score	Pris (MNOK)	Score	Pris (MNOK)
1	8,1	11	4,1
2	7,7	12	3,7
3	7,3	13	3,6
4	6,9	14	2,9
5	6,5	15	2,5
6	6,1	16	2,1
7	5,7	17	1,7
8	5,3	18	1,3
9	4,9	19	0,90
10	4,5	20	0,50

Tabell 1 viser at en prisendring på 0,4 MNOK gir en økt score på 1 fra score 1 og til score 20. .

Figur 14 viser at NNV økte bratt med økt levetid ved lave levetider. Ved høye levetider var økningen til NNV avtagende. Av dataen bak figur 14 ble det identifisert ulike verdier av levetid som fører til en fastsatt endring i NNV på 80 000 kr. Dette førte til tabell 2



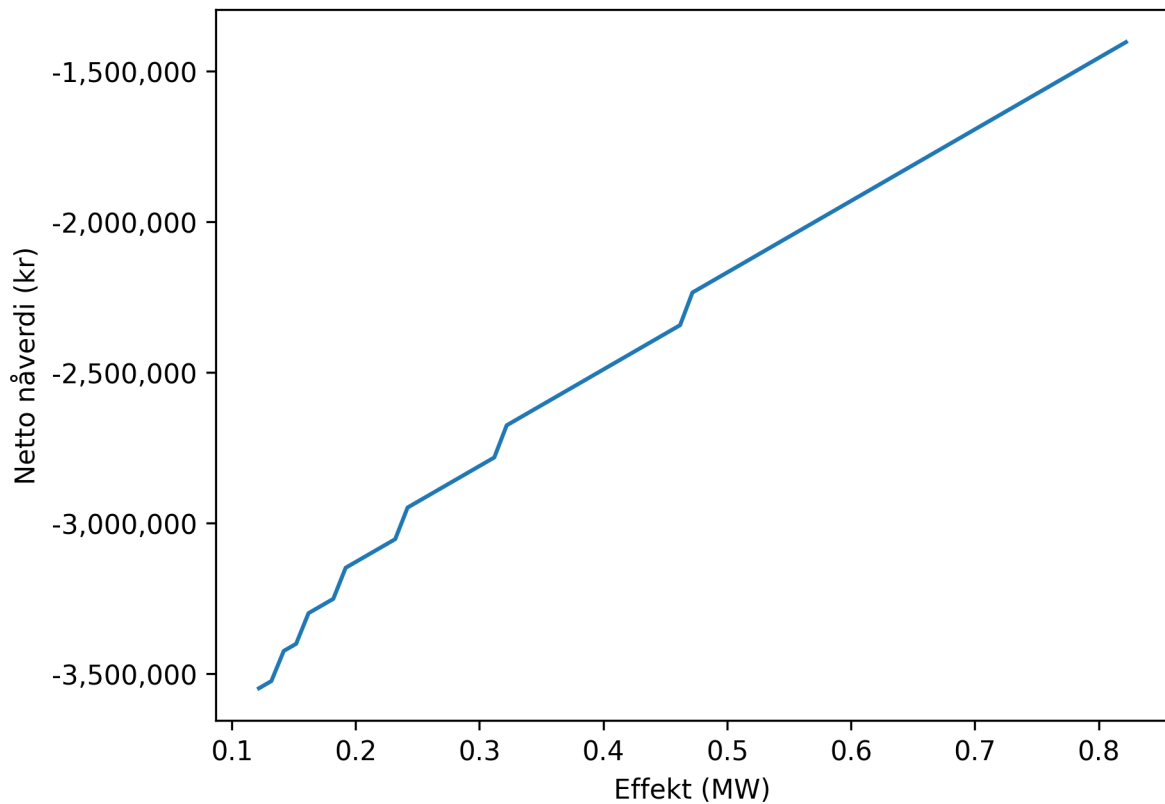
Figur 14: Figuren viser hvordan estimert NNV endret seg med endring av levetid til et batterisystem.

Tabell 2: Tabellen viser hvordan endring i levetid påvirker scoren som har blitt oppnådd.

Score	Levetid (år)	Score	Levetid (år)
1	8,0	11	17
2	8,6	12	19
3	9,2	13	21
4	10	14	23
5	11	15	26
6	12	16	29
7	13	17	32
8	14	18	37
9	15	19	43
10	16	20	52

Tabell 2 viser hvordan ulike levetider ga ulike score. Scoren endret seg for lave absolutte endringer ved lav score, men scoren endret seg først ved større absolutte endringer i levetid ved høye scorere.

I figur 15 kan en se at NNV økte med økt effekt. Av dataen bak figur 15 kan en identifisere ulike verdier av effekt til et batterisystem som førte til en fastsatt endring i NNV på 50 000 kr. Dette førte til tabell 3.



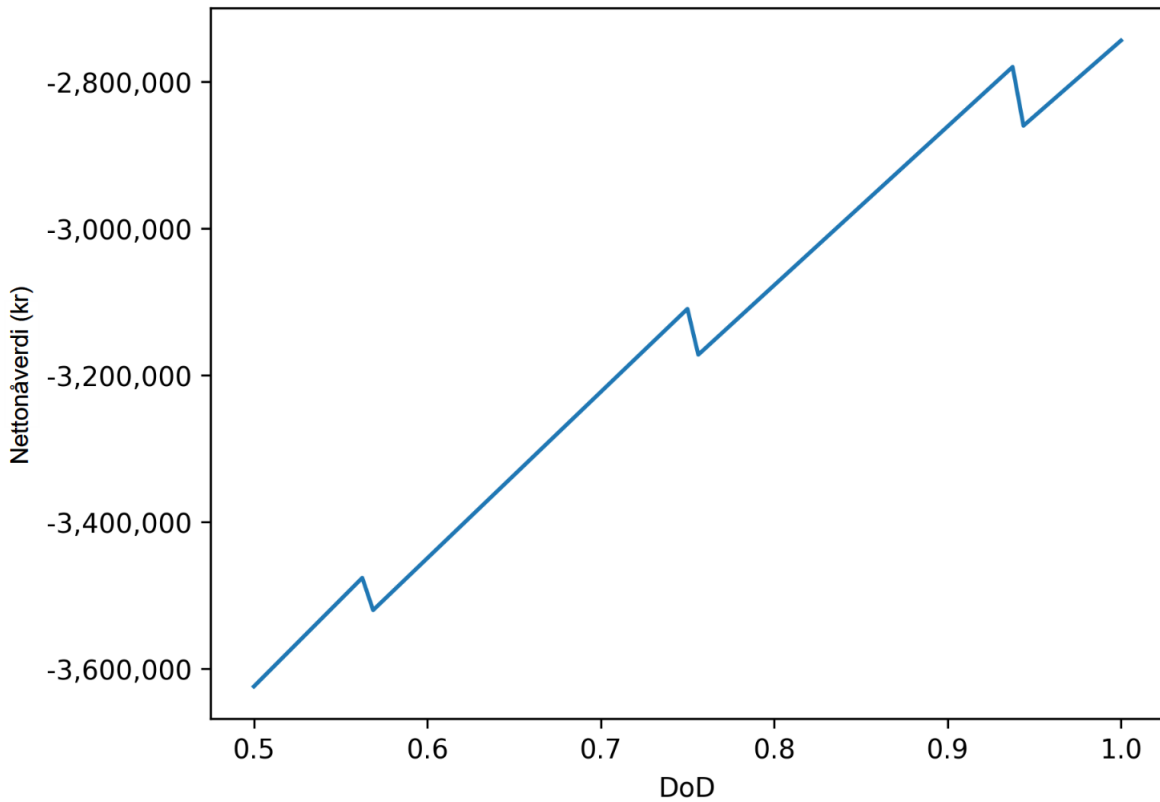
Figur 15: Figuren viser hvordan estimert NNV endrer seg med endring av effekten til et batterisystem.

Tabell 3: Tabellen viser hvordan endring i effekt påvirker scoren som har blitt oppnådd.

Score	Effekt (MW)	Score	Effekt (MW)
1	0,15	11	0,27
2	0,16	12	0,29
3	0,17	13	0,31
4	0,18	14	0,32
5	0,19	15	0,32
6	0,20	16	0,34
7	0,22	17	0,36
8	0,23	18	0,38
9	0,24	19	0,41
10	0,25	20	0,43

Tabell 3 viser at endringer i effekt på 0,01 MW og 0,02 MW førte til en endring i score.

Figur 16 viser at NNV økte med økt DoD. Ved verdier av DoD på 0,58, 0,76 og 0,95 falt NNV bratt og lite, før NNV økte videre når DoD økte. Av dataen bak figur 16 kunne en identifisere ulike verdier av DoD til et batterisystem som førte til en fastsatt endring i NNV på 40 000 kr. Dette førte til tabell 4.



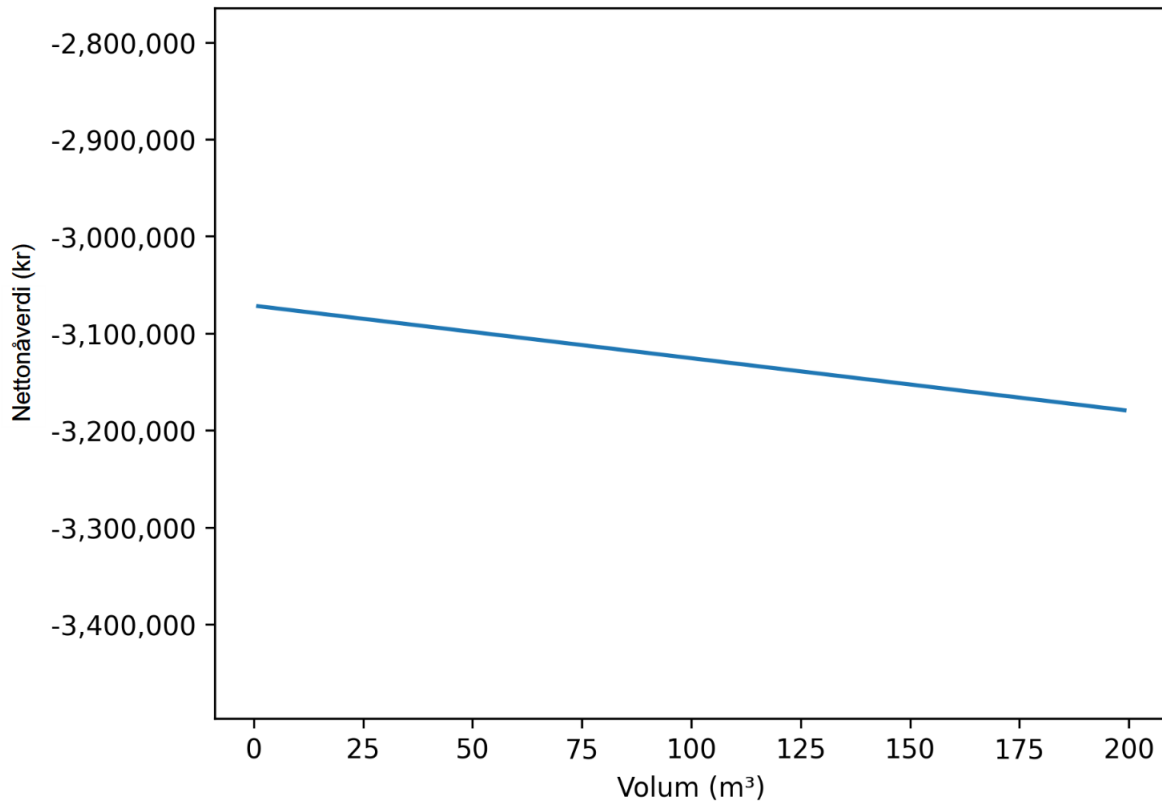
Figur 16: Figuren viser hvordan estimert NNV endrer seg med endring DoD til et batterisystem.

Tabell 4: Tabellen viser hvordan endring i DoD påvirket scoren som har blitt oppnådd.

Score	DoD	Score	DoD
1	0,54	11	0,75
2	0,59	12	0,80
3	0,61	13	0,82
4	0,62	14	0,84
5	0,64	15	0,86
6	0,66	16	0,88
7	0,68	17	0,89
8	0,69	18	0,91
9	0,71	19	0,97
10	0,73	20	0,99

Tabell 4 viser at jevn økning i score ved økte verdier av DoD. Ved score 1 til 2, 11 til 12 og 18 til 19 kreves det en stor endring i DoD for å endre scoren, sammenlignet med de andre scorene.

Figur 17 viser at NNV endret seg lite, men med negativt fortegn ved økt volum. Av verdiene som figur 17 er basert på, kunne en identifisere ulike verdier for volum som ga en endring i NNV på 8000 kr. Dette førte til tabell 5.



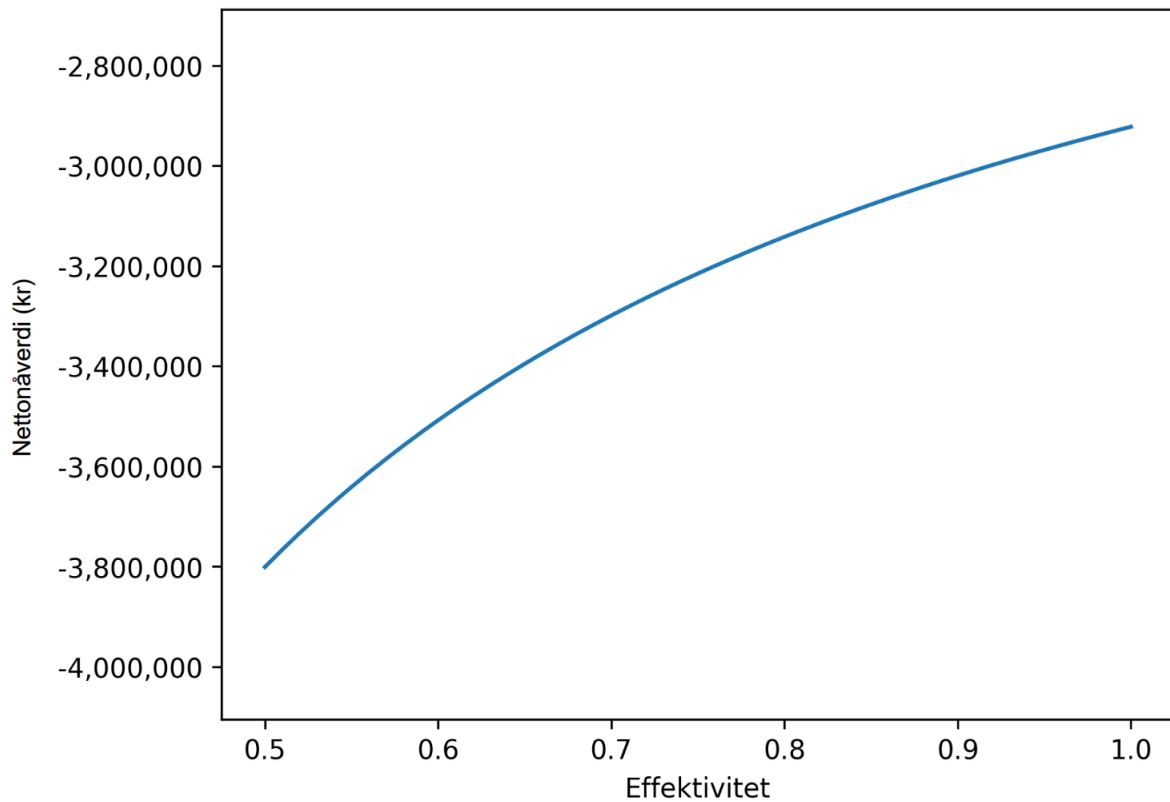
Figur 17: Figuren viser hvordan estimert NNV endret seg med endret volum til et batterisystem.

Tabell 5: Tabellen viser hvordan endring i volum påvirker scoren som har blitt oppnådd.

Score	Volum (m³)	Score	Volum (m³)
1	279	11	131
2	264	12	116
3	249	13	101
4	234	14	87
5	220	15	72
6	205	16	57
7	190	17	42
8	175	18	28
9	161	19	13
10	146	20	1

Tabell 5 viser at en endring i volum på rundt 15 m³ ga en endring i score.

Figur 18 viser at høyere effektivitet ga en høyere NNV. Økningen i NNV er avtagende ved høyere effektivitetsverdier. Det ble sett på dataen som genererte figur 18 og identifisert ulike verdier for effektivitet som ga en endring i NNV på 40 000 kr. Resultatet er presentert i tabell 6.



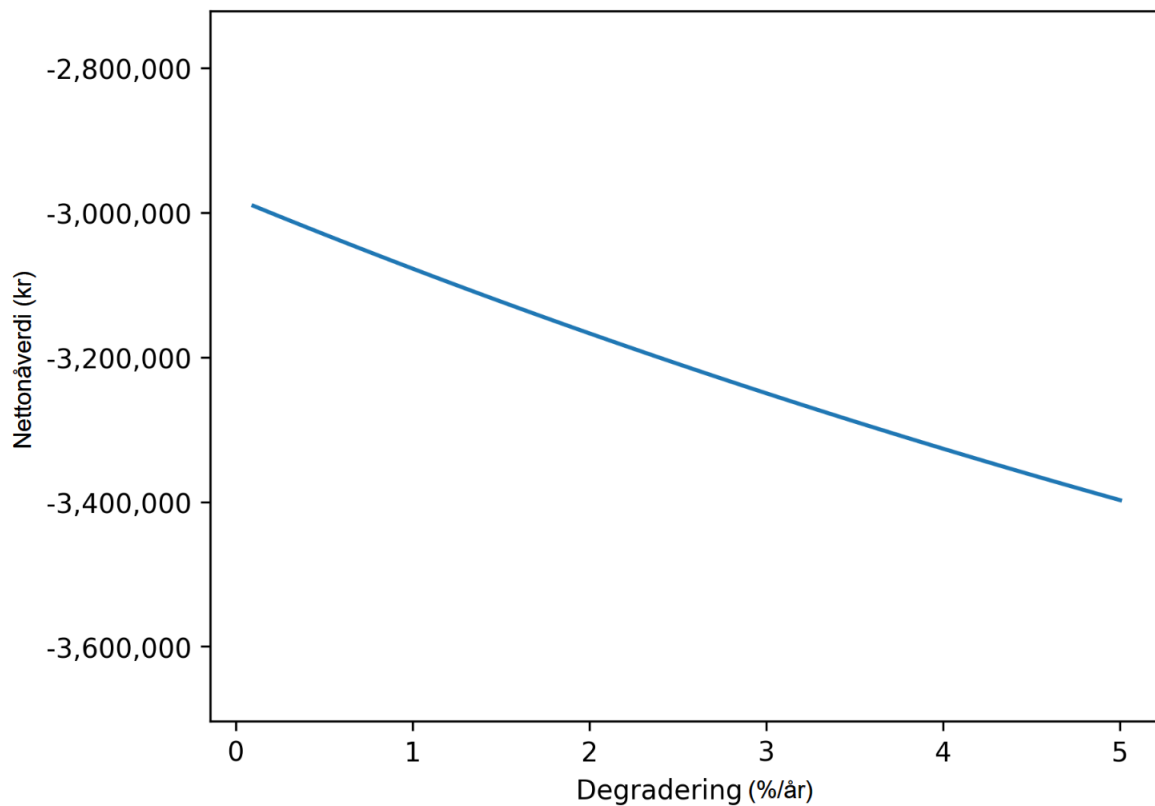
Figur 18: Figuren viser hvordan estimert NNV endret seg med endret effektiviteten til et batterisystem.

Tabell 6: Tabellen viser hvordan endring i effektivitet påvirker scoren som har blitt oppnådd.

Score	Effektivitet	Score	Effektivitet
1	0,52	11	0,69
2	0,54	12	0,71
3	0,55	13	0,74
4	0,57	14	0,76
5	0,58	15	0,79
6	0,60	16	0,82
7	0,61	17	0,85
8	0,63	18	0,88
9	0,65	19	0,92
10	0,67	20	0,96

Tabell 6 viser at at det kreves en endring på inntil 0,02 for scorer mellom 1 og 12 mens det for scorer mellom 12 og 20 kreves minst en endring på 0,03 for å endre score.

Figur 19 viser at NNV blir mindre ved økende degradering. NNV endrer seg litt mindre ved høyere verdier av degradering. Dataen bak figuren ga grunnlaget for å identifisere ulike verdier for degradering som ga en endring i NNV på 20 000 kr. Dette ga grunnlag for tabell 7.



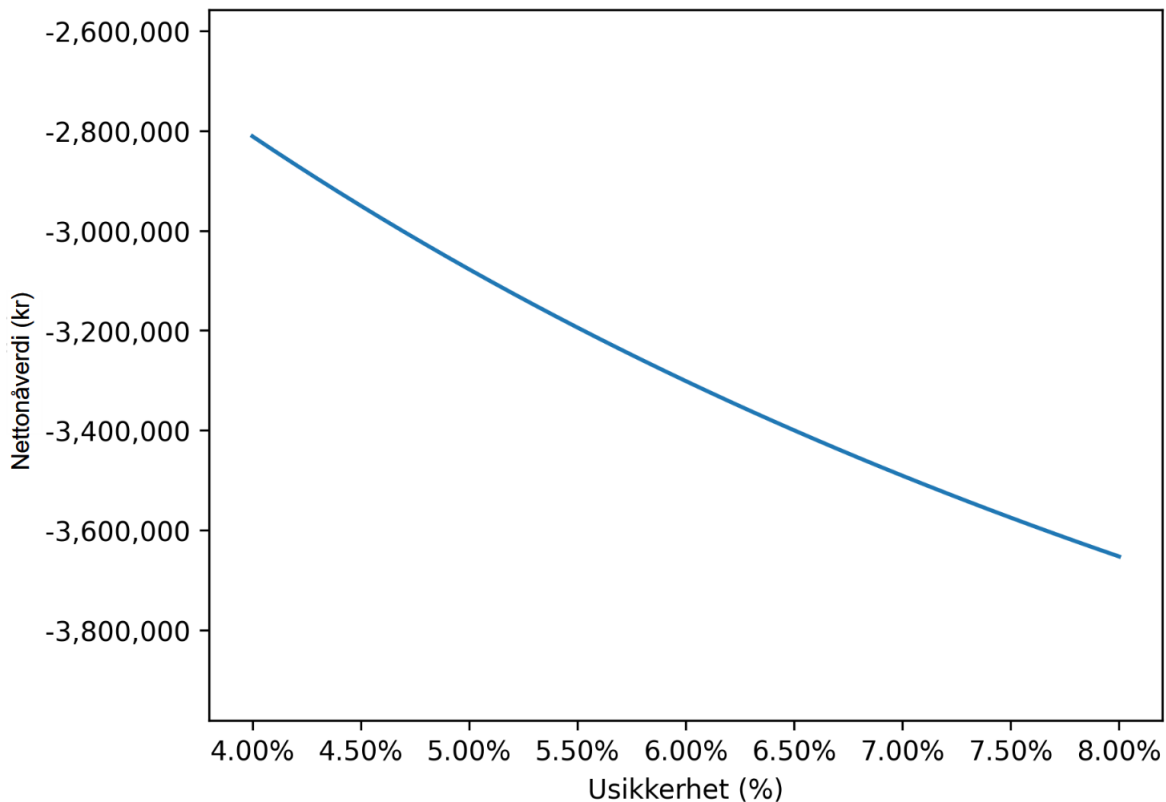
Figur 19: Figuren viser hvordan estimert NNV endret seg med endret degradering til et batterisystem.

Tabell 7: Tabellen viser hvordan endring i degradering påvirker scoren som har blitt oppnådd.

Score	Degradering (%/år)	Score	Degradering (%/år)
1	4,5	11	1,9
2	4,2	12	1,7
3	3,9	13	1,5
4	3,7	14	1,3
5	3,4	15	1,0
6	3,1	16	0,8
7	2,9	17	0,6
8	2,6	18	0,4
9	2,4	19	0,2
10	2,2	20	0,0

Tabell 7 viser hvordan ulike verdier for degradering førte til ulik score. Fra score 1 til 2, 2 til 3, 5 til 6, 7 til 8, 10 til 11 og 14 til 15 krevdes en endring på 0,03 %-poeng per år, mens det for alle andre intervaller måtte en endring på 0,02 %-poeng per år til for å endre score.

Figur 20 viser at NNV sank med økt usikkerhet. NNV sank mindre ved en økning i usikkerhet, ved høyere usikkerhetsverdier. Dataen som figuren ble laget av, ga grunnlaget for å identifisere ulike verdier for usikkerhet som en endring i NNV på 40 000 kr. Dette ga grunnlag for tabell 8.



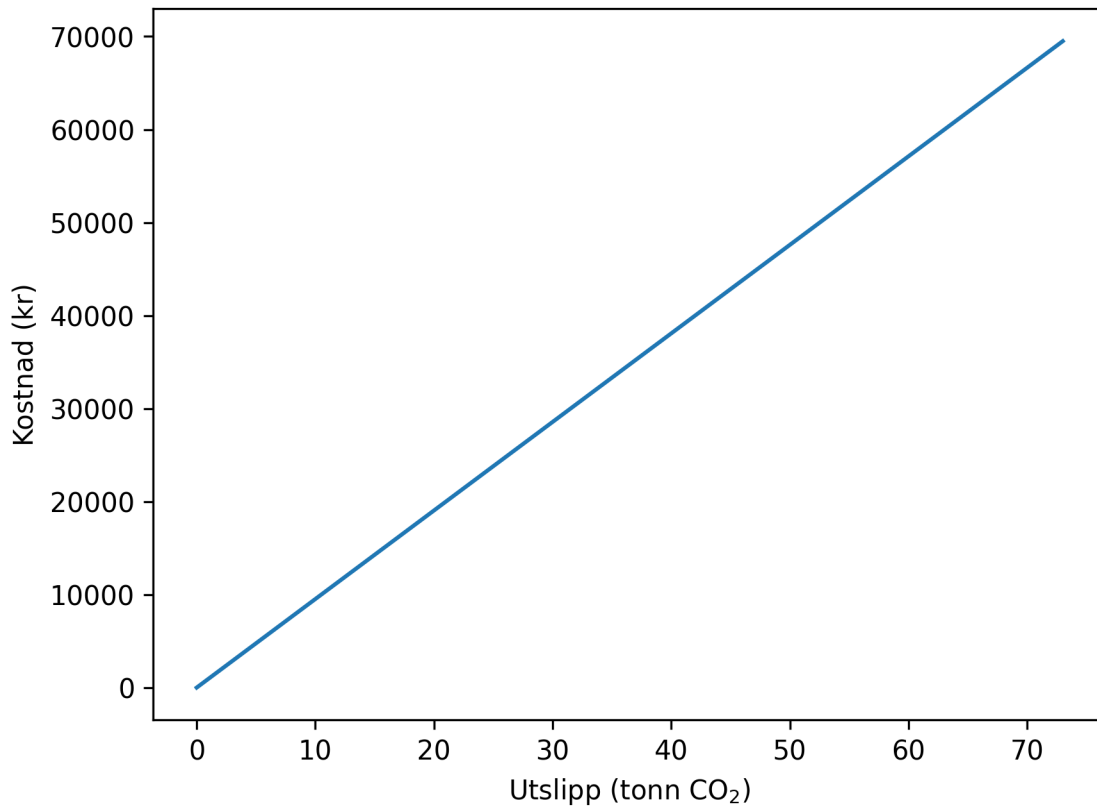
Figur 20: Figuren viser hvordan estimert NNV endret seg med endring av usikkerheten til et batterisystem.

Tabell 8: Tabellen viser hvordan endring i usikkerhet påvirket scoren som har blitt oppnådd.

Score	Usikkerhet (%)	Score	Usikkerhet (%)
1	7,9	11	5,7
2	7,7	12	5,5
3	7,5	13	5,3
4	7,2	14	5,2
5	6,9	15	5,0
6	6,7	16	4,8
7	6,5	17	4,7
8	6,3	18	4,5
9	6,1	19	4,4
10	5,9	20	4,2

Tabell 8 viser at høyere score ble oppnådd ved lavere verdi på usikkerheten. Fra score 3 til 4 og 4 til 5 krevdes en endring på 0,3 %-poeng, fra score 13 til 14, 16 til 17 og fra score 18 til 19 krevdes en endring på 0,1 %-poeng mens det for alle andre endringer krevdes 0,2 %-poeng.

Figur 21 viser at økt utslipp ga økt kostnad. Denne kostnaden påvirket NNV negativt. Det ble satt en kostnad på 952 kr per kilogram CO₂-utslipp. Dette ga grunnlag for å identifisere ulike verdier av utslipp som ga en endring i kostnad, og derav en endring i NNV på 5000 kr. Dette ga grunnlag for tabell 9.



Figur 21: Figuren viser hvordan estimert endring i CO₂-utslipp påvirket estimert kostnad forbundet med utslippene til produksjon av et batterisystem.

Tabell 9: Tabellen viser hvordan endring i miljøkonsekvens påvirket scoren som har blitt oppnådd.

Score	Miljø (Tonn CO ₂)	Score	Miljø (Tonn CO ₂)
1	95	11	45
2	90	12	40
3	85	13	35
4	80	14	30
5	75	15	25
6	70	16	20
7	66	17	15
8	60	18	10
9	55	19	5,0
10	50	20	0,0

Tabell 9 viser at en endring på 5 tonn CO₂ ga en endring i score og dette gjaldt for alle scorer.

Tabell 10 viser hvordan ulike verdier for de ulike evalueringskriteriene oppnådde en score fra 1 til 20. Tabell 10 ga et sammenligningsgrunnlag for alternativene i figur 12. De ulike evalueringskriterienes verdier påvirket NNV i ulik grad og dette har kommet til uttrykk med forskjellige vektorer i tabell 11.

Tabell 10: Tabellen viser hvordan de ulike nivåer på evalueringskriteriene slo ut på score

Score	Pris (MNOK)	Levetid (år)	Effekt (MW)	DoD	Effektivitet	Usikkerhet (%)	Degradering (%/år)	Volum (m ³)	Miljø (Tonn CO ₂)
1	8,1	8,0	0,15	0,54	0,52	7,9	4,5	279	95
2	7,7	8,6	0,16	0,59	0,54	7,7	4,2	264	90
3	7,3	9,2	0,17	0,61	0,55	7,5	3,9	249	85
4	6,9	10	0,18	0,62	0,57	7,2	3,7	234	80
5	6,5	11	0,19	0,64	0,58	6,9	3,4	220	75
6	6,1	12	0,20	0,66	0,60	6,7	3,1	205	70
7	5,7	13	0,22	0,68	0,61	6,5	2,9	190	65
8	5,3	14	0,23	0,69	0,63	6,3	2,6	175	60
9	4,9	15	0,24	0,71	0,65	6,1	2,4	161	55
10	4,5	16	0,25	0,73	0,67	5,9	2,2	146	50
11	4,1	17	0,27	0,75	0,69	5,7	1,9	131	45
12	3,7	19	0,29	0,80	0,71	5,5	1,7	116	40
13	3,3	21	0,31	0,82	0,74	5,3	1,5	101	35
14	2,9	23	0,32	0,84	0,76	5,2	1,3	87	30
15	2,5	26	0,32	0,86	0,79	5,0	1,0	72	25
16	2,1	29	0,34	0,88	0,82	4,8	0,8	57	20
17	1,7	32	0,36	0,89	0,85	4,7	0,6	42	15
18	1,3	37	0,38	0,91	0,88	4,5	0,4	28	10
19	0,90	43	0,41	0,97	0,92	4,4	0,2	13	5
20	0,50	52	0,43	0,99	0,96	4,2	0,0	1	0

Tabell 11 viser hvordan de ulike kriteriene var vektet. Hvordan et batterisystem oppnådde ulike scorere gjennom tabell 10 og hvordan de ble vektet i tabell 11, utgjorde tilsammen flermålsmodellen. Flermålsmodellen har blitt vurdert, og mange av disse vurderingene har blitt gjort til uttrykk for i diskusjonen, men førte ikke til endringer i modellen.

Tabell 11: Tabellen viser hvordan de ulike kriteriene var vektet og tilhørende relative vekter.

Kriterier	Vekt	Relativ vekt
Pris	10	0,59
Effekt	1,3	0,073
Levetid	2,0	0,12
DoD	1,0	0,059
Volum	0,20	0,012
Effektivitet	1,0	0,059
Degradering	0,50	0,029
Usikkerhet	1,0	0,059
Miljø	0,13	0,0073
Total	17	1,0

4.2 Evaluering av alternativene

Evalueringkriterienes verdier ble estimert, som gjennomgått i vedlegg A, og oppsummert i tabell 12 for hvert enkelt batterisystem.

Tabell 12: Tabellen viser de estimerte verdiene til de ulike evalueringkriteriene til alternativene inkludert i flermålsanalysen.

Kriterier	Li-ion	VRFB	Saltvann	Li-ion (brukt)
Pris (MNOK)	5,3	6,5	7,5	3,0
Levetid (år)	16	26	15	11
Effekt (MW)	0,22	0,20	0,20	0,22
DoD	0,80	0,70	0,80	0,80
Effektivitet	0,90	0,80	0,85	0,90
Usikkerhet (%)	5,0	6,0	7,5	5,5
Degradering (%/år)	1,0	0,2	2,4	1,0
Volum (m ³)	11	192	63	22
Miljø (Tonn CO ₂)	73	73	20	18

Det ble videre sett på hvordan disse egenskapene scorete i tabell 10 som ga resultatet oppsummert i tabell 13, etter å ha blitt vektet med vektene i tabell 11. Tabell 13 viser hvordan de ulike alternativene li-ionbatterisystemet, VRFB-systemet, saltvannsbatterisystemet og li-ionbatterisystemet (brukt) scorete på de ulike evalueringkriteriene. Vektene, hentet fra tabell 11, er også med i tabellen. Totalscoren ble oppsummert etter at scoren på evalueringkriteriene hadde blitt multiplisert med tilhørende score. Totalscoren viser at li-ionbatterisystemet (brukt) ble rangert øverst med 215, etterfulgt av li-ionbatterisystemet med 167, VRFB-systemet med 133 og saltvannsbatterisystemet med 90. Den relative totalscoren for batterisystemene var 9,8 for li-ionbatterisystemet, 7,8 for VRFB-systemet, 5,3 for saltvannsbatterisystemet og 13 for li-ionbatterisystemet (brukt). Den relative totalscoren som teoretisk kunne blitt oppnådd var mellom 1 og 20.

Tabell 13: Tabellen viser hvordan alternativene scorete på de ulike kriteriene og hvordan scorene ble vektet og summert opp.

Kriterier	Vekt	Relativ vekt	Li-ion	VRFB	Saltvann	Li-ion (brukt)
Pris	10	0,59	8	5	2,5	14
Levetid	2,0	0,12	10	15	9	5
Effekt	1,3	0,073	7	6	6	7
DoD	1,0	0,059	12	9	12	12
Effektivitet	1,0	0,059	19	15	15	19
Usikkerhet	1,0	0,059	15	10	3	12
Degradering	0,50	0,029	15	19	9	15
Volum	0,20	0,012	19	7	16	18
Miljø	0,13	0,0073	5	5	16	16
Total	17	1,0	167 (9,8)*	133 (7,8)*	90 (5,3)*	215 (13)*

*Viser total relativ score.

5 Diskusjon

Resultatdelen viser at Li-ionbatterisystemet, basert på brukte li-ionbatterier, ender opp som alternativet med høyest score og dermed er den klare vinneren i rangeringen av alternativene i flermålsanalysen. Det er veldig mange faktorer som påvirker flermålsmodellen illustrert i tabell 10 og 11. I dette kapitlet skal, hvordan ulike faktorene har påvirket sammenligningsgrunnlaget og rangeringen av batterisystemene i flermålsanalysen, bli diskutert.

5.1 Problemanalyse og strukturering

Det har i delkapittel 2.1 blitt redegjort for hvordan kraftsystemet er i endring og hvordan kraftsystemet vil ha et stort behov for fleksibilitet og ha endringer i kraftpriser gjennom et døgn. Eksakt hvordan denne utviklingen vil fortsette, i perioden fremover som er aktuell for batterisystemene hvis de skulle blitt realisert, er det ingen som vet eksakt. Flere store aktører har prøvd å beskrive scenario som de tror på [13], men også disse kommer med en stor grad av usikkerhet. Dette medfører en stor systematisk risiko som i stor grad kan påvirke lønnsomheten til batterisystemer. I et scenario med betydelig større behov for FFR og mulighet for å utnytte kraftarbitrasje kan det føre til at et batterisystem får en NNV som er positiv. Med de antakelsene gjort i denne oppgaven er ingen av alternativene lønnsomme.

Flermålsanalyse brukes vanligvis for å avgjøre hvilken løsning som best mulig tilfredsstiller et hovedmål, i et prosjekt, best mulig. I denne oppgaven er det ikke et konkret prosjekt som skal realiseres. En kan stille seg spørsmålet om flermålsanalyse da egentlig er det beste verktøyet for å lage et sammenligningsgrunnlag som skal nå et mål om å balansere det norske kraftsystemet. En havner i avveiningssituasjoner hvor en må anta, istedenfor at en har en spesifikk situasjon å forholde seg til. Et godt eksempel på dette er hvor stor kostnad en skal sette på volumet et batterisystem vil oppta. Det vil variere veldig fra beslutningstaker til beslutningstaker. Noen har kanskje kun en kjeller de kan avse til et slikt batterisystem, andre kan avse en liten del av lageret sitt, men må da prioritere et batterisystem over annen aktivitet i virksomheten, mens andre har kanskje ubegrenset med plass som ikke skal brukes til noe som helst. Plass er kanskje det tydeligste eksempelet, men det gjelder også til en viss grad andre faktorer som usikkerhet, levetid og pris. Å skulle anta et estimat som gjelder for alle potensielle beslutningstakere blir både utfordrende og, for mange, upresist. På en annen side vil mange av egenskapene i et godt batterisystem som skal balansere et kraftsystem, som høy effekt, god effektivitet og lang levetid, være gode uavhengig av beslutningstakerens komparative fortrinn. I første omgang vil nok kun de beslutningstakere som har tilgang på rimelig plass, vurdere å investere i et slikt batterisystem.

Til å gjennomføre flermålsanalyse og komme frem til resultat og anbefalt løsning i konklusjonen, ble undertegnende brukt. Noe av det viktigste i en godt gjennomført flermålsanalyse er å ha en god ekspertgruppe, med nødvendig bredde og spisskompetanse. Undertegnede har en stor interesse for fysikk, batteriteknologi, økonomi og investeringsanalyse. Samtidig, har undertegnede lite erfaring med flermålsanalyse, lite dybdekunnskap om batterisystemer og har ingen akademiske artikler publisert. Siden flermålsanalyse involverer en del subjektive og noen ganger ikke-transparente avveininger, kan dette ses på som en betydelig svakhet til flermålsanalysen og svekket tiltro til modellen og anbefaling som er gitt. For å håndtere dette har undertegnede prøvd å holde meg mest mulig til kvantitative verdier, og gjøre minst mulig uten at det er vist i oppgaven. Men alle kvantitative verdier er estimater bestemt av undertegnede, så en får ikke fjernet undertegnedes subjektivitet fra arbeidet som er gjort.

Hovedmålet til denne oppgaven og analysen, var å bidra til å balansere det norske kraftsystemet. Delmålene som ble valgt for å nå hovedmålet var å skulle levere FFR og utnytte kraftarbitrasje i det norske kraftsystemet. Inntektene en oppnår ved å selge FFR og utnytte kraftarbitrasje, er ifølge beregningene gjort i denne oppgaven, ikke store nok til at det er en lønnsom investering. En skal stille seg spørsmålet ved om valg av delmål var riktig for å best mulig nå hovedmålet om å balansere det norske kraftsystemet. FFR er en systemtjeneste som kom på markedet i 2021 og som etterspørres i en begrenset periode av året. Resten av året, utnytter batterisystemet kun kraftarbitrasje for å få mer inntekter. I en artikkel ble det estimert at batterisystem til utnytting av kraftarbitrasje av kraftsystemet er lønnsomt i alle land som var inkludert, med unntak av Norge [15]. FCR er en mer etablert systemtjeneste som batterisystem kan være i stand til å levere. FCR trengs gjennom et helt år og kan være en tjeneste en kan vurdere å tilby i periodene man ikke tilbyr FFR og kanskje til og med istedenfor FFR. Dette kan sørge for høyere inntjening som kan bidra til å større grad nå hovedmålet om å balanser kraftsystemet og sørge for at en investering i batterisystemet er lønnsomt. Dette ville også eventuelt potensielt få konsekvenser for scorer og vektning av parametere. Det antas at pris ville fått en noe lavere vektning og at alle andre operasjonelle egenskaper som degradering, effektivitet, DoD og levetid, relativt sett, ville økt. Det er verdt å merke seg at FCR vil kreve mer kapasitet av et batteri og høyere effekt over lengre tid, som kan påvirke faktorer som degradering og levetid. Kanskje ikke en enten eller inngang er det beste, men en gyllen middelvei med optimal kombinasjon mellom FFR, FCR og utnytting av kraftarbitrasje.

Som forklart i delkapittel 2.1.3 så får en mindre igjen for å utnytte kraftarbitrasje på grunn av nettleie og statlige avgifter. Hvis en er en beslutningstaker, som for eksempel har en fabrikk som bruker mye elektrisk energi og er avhengig av dette, også i de timene prisene er på sitt høyeste, kan en vurdere å bruke et batterisystem for å dekke energibehovet i den dyreste perioden i løpet av et døgn. Siden alternativet er å betale høy kraftpris med tilhørende nettleie og statlige avgifter, vil en slik beslutningstaker kunne få mer nytte av et batterisystem en annen som kun investerer i et batterisystem som skal selge og kjøpe elektrisk energi, i tillegg til å levere FFR. Investering i et batterisystem vil også være et tiltak som kan redusere bedriftens eksponering mot systematisk usikkerhet som høye svinginger i kraftpris kan bringe med seg. Dette kan medføre at en, itillegg til økt fortjeneste, kan sette et lavere krav til diskonteringsrente, som gjør et batterisystem mer lønnsomt. Dette illustrer igjen utfordringene med å lage en generell modell som skal kunne brukes av flere beslutningstakere, når det er forskjell på hva slags muligheter og fortrinn forskjellige beslutningstakere har.

En stor utfordring i gjennomføring av denne flermålsanalysen har vært å finne gode kommersielle alternativer til å løse hovedmålet. For å finne alternativer ble det gjennomført internettsøk og sendt flere mail til produsenter. En utfordring er at stasjonære batterisystem til balansering av kraftsystem som regel blir utformet for hvert enkelt tilfelle. Siden denne oppgaven er en litteraturoppgave, har det ikke blitt innhentet tilbud fra potensielle leverandører. Sintef utarbeidet en konseptutredning for et konkret prosjekt hvor de trengte batterisystem [25]. Her ble det innhentet estimer fra leverandører som hadde nok informasjonen til at det var mulig å gjennomføre en flermålsanalyse. Batterisystemene i Sintef sin konseptutredning skulle brukes og være optimalisert for å bedre utnytte et solcelleanlegg på Tiller videregående skole. Dette medførte et behov for annerledes egenskaper enn til hovedmålet i denne oppgaven. Motivasjonen for å gjennomføre en flermålsanalyse og finne det beste batterisystemet var, som beskrevet i introduksjon, å prøve å skape en konsensus for hvilke egenskaper til et batterisystem som er viktig for å bidra til balansering av det norske kraftsystemet, etablere et sammenligninggrunn som kan brukes på nåværende batterisystem og illustrere hvilke trade-offs som skal til for å utbedre et batterisystem. En nok fikk nok ikke kåret

hvilket batterisystem som er det beste, blant alle tilgjengelig batterisystemer i hele verden, til å balansere det norske kraftsystemet. Alternativene ble derimot vurdert til å tilfredstille behovene som ligger latent i motivasjonen bak å gjennomføre denne flermålsanalysen.

5.2 Modellen

Det ble i metoden etablert et målhierarki for balansering av det norske kraftsystem, illustrert i figur 11. De fire batterisystemene li-ionbatterisystem, li-ionbatterisystem (brukt), VRFB-system og saltvannsbatterisystem ble vurdert etter hvordan de gjorde på evalueringskriteriene pris, effekt, levetid, DoD, usikkerhet, energitetthet, effektivitet, degradering og miljøkonsekvenser. En endring i et evalueringskriterie påvirket NNV på hver sin måte og modellen som estimerte dette er vist i vedlegg B. Scriptet ble utviklet av ekspertgruppen og skulle simulere kontantstrømmene til investeringen av et batterisystem gjennom dets levetid. Miljøkriteriet var ikke en del av scriptet, og ble behandlet utenfor som beskrevet i metoden.

Det første og viktigste kriteriet i modellen var prisen på batterisystemet. Figur 13 viser hvordan NNV endret seg med endring i pris på batterisystemet. Siden investering av et batterisystem blir gjort i år null i en NNV-analyse, vil hver krone brukt på et batterisystem føre til en krone lavere NNV. For at det forhåndsestimerte li-ionbatterisystemet skulle få en positiv NNV måtte batterisystemet ha en pris på 2,22 MNOK eller lavere. Batteriprisene til alternativene varierte mellom 3,0 og 7,7 MNOK som vist i tabell 12. Med unntak av li-ionbatterisystemet basert på brukte li-ionbatteri, er alle batterier langt dyrere enn det som skal til for å få en positiv NNV. Dette viser at batterisystemer bør bli vesentlig rimeligere før de kan brukes til bruksområdet i denne i oppgaven. Hvilke av teknologiene i analysen, men også ellers i verden, som fremover vil kunne forbedre dette kriteriet mest, vil bli veldig spennede. Li-ion batterier kan få utfordringer for å få tak i nok råmaterialer, med den etterspørselen som er ventet fremover. Saltvannsbatterier og VRFB har ikke denne samme utfordringer og er to relativt sett umodne teknologier, som kanskje har et stort og ubenyttet potensial for å få prisen på et batterisystem vesentlig rimeligere. For å oppnå en endring i score for pris, ble det det krevd en endring på 400 000 kr i NNV. Dette gjorde at det var mulig å involvere alle prisene til alle batterisystemene og potensielle priser som ville gi en positiv NNV og samtidig holde seg innenfor grensene 1 og 20 satt for scorene til denne analysen. Vekten ble vilkårlig satt til 10.

NNV er, ifølge modellen, bratt avhengig av levetiden de første 25 årene. Som en kan se i figur 14 øker NNV bratt med levetiden før den avtar markant rundt år 25 og er nesten helt flatt når levetiden nærmer seg 100 år. Dette gjenspeiler seg ved at å øke scoren fra 4 til 5 kun trenger ett år lengre levetid, mens å øke score fra 19 til 20 krever hele ni år lengre levetid. Det kan være utopisk å diskutere levetider på 100 år, men den stadige utviklingen av batteriteknologier og potensielle teknologier som har ned mot 0 % degradering per år, gjør det relevant å undersøke nytten av levetider som er veldig lange. Grunnen til utflatingen av NNV ved lange levetider er hovedsakelig på grunn av diskonteringen av fremtidig kontantstrømmer. Det er også lagt inn en estimert inntektsøkning på 5 % fra FFR de første 10 årene batterisystemet er i drift, som etter 10 år faller til 2 %. Det er utfordrende å komme med gode estimat på hva en kan forvente av kraftarbitrasje og behov for en systemtjeneste som FFR. I Statnett sin langsiktede markedsanalyse peker de på at det vil være relativt store variasjoner i kraftprisen frem mot 2030, på grunn av innfasing av mye uregulerbar kraftproduksjon frem mot 2030. Fra 2030 vil variasjon i kraftpris gå ned på grunn av at blant annet batterisystemløsninger og hydrogen vil ha blitt lønnsomt [13]. Hvis en derimot antar at variasjon i kraftprisen og behov for FFR vil øke mer etter 2030, vil lang levetid

bli et viktigere kriteriet enn det er i denne flermålsanalysen.

Degradering, som henger sammen med levetid, fikk en vektning på 0,50 i flermålsanalysen. Hvis en hadde inkludert et større intervall med ulike degraderingsverdier per år, så ville degradering blitt mer vektet, men det ble vurdert at høye nok verdier ble involvert for analysen. 0 % degradering var også inkludert. Å hindre for mye degradering har vært viktig for at et batterisystem skal tåle så mange ladesykluser og ha så lang levetid som mulig. Denne flermålsanalysen har degradering en vektning på 0,50 som indikerer at det ikke er en så viktig faktor. Det er antatt at en degradering i kapasitet ikke går utover effekten som kan leveres. Dette medfører at inntektene fra FFR ikke blir påvirket av degradering. Inntektene fra å utnytte kraftarbitrasje vil tape seg noe over tid. Levetid er den faktoren, sett bort i fra pris, som har høyest vektning. Degradering vil være en bakenforliggende årsak som påvirker levetiden. I denne oppgaven har de likevel blitt holdt som to ulike egenskaper. Det har vært for å se hvordan redusert kapasitet og levetiden til et batterisystem hver for seg påvirker lønnsomheten til et batterisystem. Kanskje hadde et mer fornuftig valg vært å hatt egenskapene levetid og redusert kapasitet over tid som to kriterier som blir vurdert. Da ville degradering vært en bakenforliggende forklaring for begge kriteriene, men ikke vært en egenskap som ble vurdert direkte. En annen mulighet er å erstatte både levetid og redusert kapasitet med degradering. Da ville degradering blitt et mye viktigere kriterie for flermålsanalysen. Men det kunne komplisert analysen en del, for ulike batteriteknologier kan ha nådd EoL ved ulik grad av degradering.

DoD fikk en vekt på 1,0 og anslår hvor stor del av batterikapasiteten som kan utnyttes. En ser av figur 16 at NNV er avhengig av DoD. Jo større del av batterikapasitet en kan utnytte, jo mer energi kan en selge og kjøpe for å utnytte kraftarbitrasje. Å levere FFR krever såpass lite energi i forhold til kapasiteten til batterisystemet, at FFR er antatt å være uavhengig av DoD. På figure 16 kan en se tre små fall i NNV. I scriptet vist i vedlegg B, som regner ut NNV for et batterisystem, er det lagt inn en straff som går utover prisen man kjøper kraft for og prisen man selger kraft for. Denne straffen inntreffer på gitte verdier, for å ta hensyn til at en må kjøpe kraften utenfor den billigste timen i et døgn og selge utenfor den dyreste timen i et døgn. Denne straffen er kodet slik at prisen på all kraften en kjøper og selger blir påvirket, ved kun en liten endring over visse grenser som oppstår. Dette er en svakhet ved denne modellen, som bør utbedres. Dette fører til at nødvendig endring DoD blir kunstig stor for enkelte scorer i tabell 4, som for eksempel fra score 1 til 2 og score 11 til 12.

For å oppnå høy levetid, må en ofte begrense DoD. Lav DoD kan da også bidra til lav degradering. Hvis en har et batterisystem med høy levetid og lav grad av degradering, som ved VRFB-systemet inkludert i flermålsanalysen, kan en som leverandør av et slikt system vurdere om en kan øke DoD for å øke lønnsomheten. En må da passe på at dette ikke går for mye utover levetiden og degraderingen. Men en kan ved eksempelet med VRFB-systemet, ifølge denne flermålsanalysen, ofre 3 års levetid og 0,2 prosentpoeng høyere degradering hvis en får 0,06 høyere DoD og fortsatt oppnå en bedre totalscore. Dette kan være nyttig informasjon for batteriteknologutviklere å ha i bakhodet når de utvikler batteristyringssystemer. En slik avveining blir mye vanskeligere å forsvare hvis batterisystemet har lavere levetid, da en endring i levetid er mye mer verdifull ved relativt lave levetider, illustrert i figur 14.

Effekt er et viktig evalueringskriteriet som både er viktig for å levere FFR og utnytte kraftarbitrasje. Jo høyere effekt et batterisystem har, jo mer FFR kan en tilby til Statnett. I tillegg vil en kunne oppnå en høyere kraftpris, på kraft en selger og lavere kraftpris, på kraften en kjøper ved høyere effekt. Som en kan se av figur 15 vil et forhåndsestimert li-ionbatterisystem oppnå en NNV på -3,5

MNOK ved omtrent 0,13 MW og -1,5 MNOK ved 0,8 MW. Siden ingen av batterisystemene kunne levere mer enn 0,22 MW og mange kommersielle batterisystemer varer i fire timer ved maksimal utladning, så evaluerer flermålsanalysen kun verdier opp til 0,43 MW, som vist i tabell 3. Hvis en klarer å utvikle et batterisystem som levere effekt høyere enn 0,43 MW uten at det i for stor grad går på bekostning av prisen til batterisystemet, bør modellen justeres. Tabell 10 gir score til verdier utifra et her og nå perspektiv. Når utviklingen fortsetter, vil det være nødvendig å justere tabellverdiene 10 og vektingen i 11. Oppladning og utladning med høye effekter kan for ulike batteriteknoliger slite på batteriet, og føre til økt degradering og redusert levetid. Dermed bør en optimalisere dette samspillet, og tabell 10 og 11 gir grunnlaget til denne flermålsanalyse for å finne et slikt optimalt samspill.

At et batterisystem har en god effektivitet er helt avgjørende for å kunne balansere et kraftsystem. Vektingen er på 0,5 i denne modellen, men som en kan se i figur 18 så øker NNV relativt mye med økt effektivitet ved lave verdier for effektivitet. Ofte vil effektiviteten være lavere ved høy ut- og oppladning av et batteri. Dette skjer blant annet fordi overpotensialer ofte øker med økt elektrisk strøm. Hvis en har et batterisystem som har veldig høy effektivitet, kan en vurdere å prøve la batterisystemet ha høyere makseffekt, på tross av at effektiviteten går ned, da effekt er et mer vektet kriteriet og at NNV endrer seg mindre ved høy effektivitet sammenlignet med lav effektivitet. I vedlegg C er egenskapen topp opp- og utladning vurdert. En kunne for eksempel hatt en høy verdi for topp opp- og utladning slik at en kunne fått mest mulig igjen for FFR, da FFR utløses kun et fåtall ganger i løpet av et år, men hatt lavere effekt når en skal utnytte kraftarbitrasje, siden effektiviteten har mer å si her.

Usikkerhet er vektet med 1,0 og er en viktig faktor når en skal vurdere ulike batterisystemer, i sær grad fordi inntektene til et batterisystem i stor grad ligger langt frem i tid. Beslutningstakere ønsker som regel minst mulig risiko for sine investeringer, og det er viktig å få frem denne dimensjonen for beslutningstakeren. Alle kontantstrømmer blir diskontert med en høyere rente om usikkerheten er høy. Dermed er det viktig at teknologien er vel utviklet og velprøvd. Hvis ikke batterisystemet er det, må batterisystemet kompensere med å ha mye bedre forventede egenskaper. Hvis en kun klarer å lage batterisystemer som ellers er like gode som den mest etablerte teknologien, vil beslutningstakere foretrekke det etablerte alternativet. Høyere diskonteringsrente vil i særlig grad påvirke batterisystemer som har mye av inntektene sine langt frem i tid. Dette vil da gjelde batterisystemer med høy levetid og lav grad av degradering. Dette tar ikke modellen hensyn til, og er en betydelig svakhet.

Volum er vektet med 0,20, nest lavest av evalueringskriteriene, men kan likevel være en avgjørende faktor for beslutningstakere. For å vurdere hvor mye volumet til et batterisystem, negativt påvirker NNV, ble det estimert en kostnad på 50 kroner per kubikkmeter per år. Dermed vil et batterisystem, som opptar stor plass, koste mer enn et batterisystem som opptar lite plass. Det mistenkes at 50 kroner per kubikkmeter per år er et noe konservativt anslag og kostnaden i mange situasjoner vil være høyere enn dette. Det er interessant å se, hvor mye plass en gitt mengde kapasitet opptar i et batterisystem, er såpass ubetydelig for å avgjøre hvilket batterisystem som har blitt vurdert til å være best til å balansere det norske kraftsystemet. Hvor mye plass en gitt mengde kapasitet opptar er en helt avgjørende egenskap for andre bruksområder, som elbiler, mobiltelefoner og laptopper, som gjerne kan gå bekostning av rimelighet. Enkelte som vurderer å investere i et batterisystem har kanskje et konkret rom, lager eller område til disposisjon. Dette kan føre til at et batterisystem som opptar veldig stor plass, som for eksempelet VRFB systemet, ville blitt ekskludert før det i det hele tatt rakk å bli vurdert. Utifra vektingen som volumkriteriet har oppnådd, kunne en argumentert å

fjerne dette kriteriet for å gjøre plass til et av kriteriene beskrevet i vedlegg C, men på grunn av antatt ulikhet hos beslutningstakeres forutsetninger, ble dette kriteriet stående i analysen.

Det aller minst vektet kriteriet er miljøkriteriet. For å vurdere hvor mye miljøkriteriet skulle veies i analysen, ble et tonn CO₂-utslipp verdsatt til -952 kroner. Det er denne satsen som brukes for utslipp som er ikke-kvotepliktig i statlige prosjekter [24]. For hvert år som går, vil denne satsen øke mot 2030, og vil få økt betydning hvis en skal bruke denne satsen i sin evaluering. Selv om kriteriet er vektet med 0,20 i tabell 11, og ikke vil påvirke hvilket batterisystem som kommer best ut, er kriteriet beholdt. Enkelt beslutningstakere vil kanskje argumentere for at de ikke skal verdsette miljøkriteriet i det hele tatt. Andre beslutningstakere, som for eksempel tar beslutninger på vegne av virksomheter som ønsker å ha et image som indikerer at de er miljøvennlige kan verdsette miljøkriteriet vesentlig høyere enn i denne flermålsanalysen. Det ville vært interessant å se på andre miljøkriterier, som for eksempel resirkulerbarhet og bruk av miljøgifter, i en fremtidig analyse, som kunne ført til at miljøkriteriet kunne blitt tyngre vektet.

5.3 Rangering av alternativene

Evalueringen av alternativene i delkapittel 4.2 viser at Li-ionbatterisystemet (brukt) kom klart best ut med en total score på 215. Li-ionbatterisystemet fikk total score 166, VRFB-systemet fikk 132 mens saltvannsbatterisystemet fikk en totalscore på 90. For å komme frem til disse scorene har det blitt gjort en estimering av verdier til de ulike batterisystemene til de ulike evalueringskriteriene. For å estimere disse verdiene ble Sintef sine vurderinger i sin konseptutredning, datablad fra produsenter og relevant litteratur lagt til grunn og dette er gjennomgått i vedlegg A.

Ser man bort i fra pris og usikkerhet, så oppnår li-ionbatterisystemet en totalscore på 72, mens VRFB-systemet oppnår totalscore på 73, saltvannsbatteriet totalscore på 62 og det brukte li-ionbatterisystem totalscore på 63. Dette viser at li-ionbatterisystemet og VRFB-systemet er de alternativene som er best egnet til å balansere det norske kraftsystemet, hvis en ser bort i fra egenskaper som er av en mer økonomisk art. Men det er ikke stor avstand mellom dårligste og beste batteri, som viser hvor viktig de økonomiske kriteriene er. Som en kan se i tabell 13 får li-ionbatterisystemet (brukt) 14 i score for kriteriet pris, som er det klart viktigste kriteriet i flermålsanalysen. Li-ionbatterisystemet (brukt) gjør det svakest av alternativene på levetid, som er det nest viktigste kriteriet. Skulle det brukte li-ionbatterisystemet vise seg å ha en lengre levetid enn det som er estimert, kan alternativet øke sitt forsprang i denne rangeringen.

Den eneste muligheten for batterisystemene som ikke blir rangert øverst til å bli rangert øverst, er å bedre prisen betraktelig. For li-ionbatterisystemet ville en endring på pris fra 5,3 MNOK til 3,3 MNOK ført til at systemet hadde fått 50 høyere totalscore og akkurat fått en høyere totalscore enn li-ionbatterisystemet (brukt). Selv om noen av batterisystemene hadde scoret 20 på hvilket som helst annet evalueringskriteriet enn pris, ville det ikke vært nok til å få høyest total score. Dette viser at li-ionbatterisystemet (brukt) i denne analysen er en ganske robust vinner og med stor sannsynlighet ville blitt rangert øverst, selv med videre små endringer i modellen.

Vurderingene bak verdiene til egenskapene til alternativene er gjennomgått i vedlegg A. Disse estimatene er det forbundet mye usikkerhet til. Som Hans Eric Melin viser til i sin artikkel om litium-ion batteriers klimapåvirkning, den meste etablerte batteriteknologien inkludert i denne oppgaven, så er litium-ion batteri verdikjeden kompleks. I 2019 fant Melin kun 3 studier, gjennomført etter 2012, som hadde brukt data fra reelle batterifabrikk, for å beregne litium-ionbatteriets klimapåvirkning [26]. Utslippene en kommer frem til er avhengig av batteritype, hvordan en regner

seg frem til utslippene og energimiks [26]. I artikkelen A review on the key issues of the lithium ion battery degradation among the whole life cycle, illustreres hvordan faktorer som valg av anode, katode, elektrolytt, kjølesystem, temperatur, utladningss hastighet, SOC og fylling av elektrolytt på hver sin måte påvirker degradering hos li-ionbatterier [27]. Hver enkelt egenskap hos et batteri anses som kompleks, hvor en endring i en faktor påvirker en annen faktor som bidrar med vesentlig usikkerhet rundt verdiene som er estimert hos de ulike egenskapene til de ulike alternativene.

6 Konklusjon

6.1 Konklusjon

Problemstillingen som denne oppgaven har forsøkt å svare på var å finne hvilket batterisystem som er best egnet til å levere FFR til Statnett kombinert med å utnytte arbitrasje i kraftprisen. Hovedformålet med å svare på problemstillingen var å danne et sammenligningsgrunnlag som avgjør hvilket batterisystem som er best egnet til å bidra til balansering av kraftsystemet i Norge. Det ble lett etter batterisystem som skulle kunne levere FFR og utnytte kraftarbitrasje. Utgangspunktet for hovedformålet, er et kraftsystem som til enhver tid skal holdes i balanse. Dette har i lang tid vært ganske greit, men en stadig økning av uregulerbar kraftproduksjon i kraftmiksen gjør at behovet for fleksibilitet vil øke i tiden fremover.

Utgangspunktet for å danne et sammenligningsgrunnlag og finne det beste batterisystemet var å gjennomføre en flermålsanalyse. Det ble lett etter batterisystem som aktører kan investere i, for å selge systemtjenesten FFR til Statnett og utnytte kraftarbitrasje i kraftprisen ved å lade opp batterisystemet når kraftprisen er lav og lade ut batterisystemet når kraftprisen er høy og levere denne elektriske energien på kraftsystemet. Ekspertgruppen som gjennomførte flermålsanalysen var undertegnede og kan ses på noe som ikke nødvendigvis øker tiltro til resultatene som en kom frem til. For å finne alternativer til å balansere det norske kraftsystemet, ble det lett etter kommersielt tilgjengelige batterisystemer på internett gjennom utallige internettsøk. Til slutt ble de fire batterisystemene som Sintef hadde sammenlignet i "Konseptutredning - Flesible løsninger for energilagring ved Tiller vgs" valgt som de fire batterisystemene som skulle evalueres i flermålsanalysen [25].

Det ble etablert et målhierki som illustrert i figur 12. De fire alternativene li-ionbatterisystem, li-ionbatterisystem (brukt), VRFB-system og saltvannsbatterisystem ville ha ulike verdier på evalueringskriteriene pris, effekt, levetid, DoD, usikkerhet, energitetthet, effektivitet, degradering og miljøkonsekvenser. Disse evalueringskriteriene påvirket på hver sin måte enten delmålene FFR og utnytting av arbitrasje som skulle balansere kraftsystemet i Norge. Utifra hvilke verdier batterisystemene hadde på de ulike evalueringskriteriene, ville de kunne få ulike score som ble satt i et intervall fra 1 til 20. For å estimere ulike kriterers vektning, ble det estimert hvordan ulike verdier for kriteriene endret NNV. Pris, levetid, effekt, DoD, effektivitet og usikkerhet var kriteriene som ble veid tyngst, mens volum og miljøkriteriet skilte seg ut med lav vektning.

Det ble estimert verdier for de ulike evalueringskriteriene, for de ulike alternativene. Kombinert med scorene oppnådd fra tabell 10 og vektene fra 11, fikk li-ionbatterisystemet (brukt) 215 poeng, li-ionbatterisystemet fikk 167 poeng, VRFB-systemet fikk 133 poeng mens saltvannsbatterisystemet fikk 90 poeng. Høyest score på priskriteriet var utslagsgivende for li-ionbatterisystemet, men også det faktum at verdiene til flere av evalueringskriteriene til batterisystemet ble estimert å holde tritt med det ordinære li-ionbatterisystemet. Selv om li-ionbatterisystemet ble rangert som det mest egnede batterisystemet for å bidra til balansering av det norske kraftsystemet, ble batterisystemet estimert, i scriptet i vedlegg B å ha en negativ NNV. Dermed vil, ifølge denne flermålsmodellen, ingen av batterisystemene bli anbefalt for å balansere det norske kraftsystemet.

6.2 Videre arbeid

Det er første gang, som undertegnede vet om, at det har blitt laget en flermålsmodell med scorer og vektning på denne måten for å sammenligne batterisystemers egenskaper. I tillegg, så er FFR, et av to bruksområder for batterisystemet i denne oppgaven, en systemtjeneste som først ble etablert på markedet i 2021. Dette har gjort at denne oppgaven ikke har lent seg på tidligere lignende arbeid som har blitt gjort og en har gjort flere valg, som kan forbedres i videre arbeid. En grundigere evaluering av hver verdi til evalueringskriteriene til hvert alternativ kunne gitt denne flermålsanalysen mer tyngde og troverdighet og ikke minst mer presise verdier. En bør se på muligheten for å utfordre de aller fleste verdiene som er med i denne oppgaven. Det er også økt mulighet for å gjøre en grundigere jobb for å finne gode estimater for hva et rimelig estimat for hvor mye kostnaden av å ta opp et volum på et batterisystem er. Det samme gjelder, ikke minst, for å finne gode estimater på hva en kan forvente av variasjon i kraftprisen.

Scriptet som ble brukt for å vurdere hvor lønnsomt et batterisystem er, og hvordan endring i verdiene til de ulike evalueringskriteriene påvirket NNV, kan forbedres. Det finnes simuleringstøytøy, som undertegnede per dags dato ikke har kjennskap til, som kan brukes. Disse simuleringstøytøyene antas å være bedre enn det en selv klarer å komme frem til med en noe beskjeden programmeringskompetanse.

Det ville vært interessant å se på andre evalueringskriterier og hvor viktige disse er for et batterisystem til balansering av det norske kraftsystemet. Noen av egenskapene i vedlegg C, kan for eksempel vurderes, hvorav peak effekt kanskje er den mest interessante. Batteriteknologi er en kompleks teknologi og for å kunne gjennomføre en god flermålsanalyse kreves en ekspertgruppe. For fremtidige sammenligningsoppgaver bør det ses på muligheter for å sette sammen ekspertgruppe på en annen måte enn i denne oppgaven. Andre alternativer til batterisystemer bør også vurderes, der det er mulig. Brenncelleteknologi kan brukes til å balansere det norske kraftsystemet og det ville vært svært interessant å se hvordan et brenncelle-system hadde klart seg målt opp mot ulike batterisystem i flermålsanalyse [13].

Hvert batterisystem har sine styrker, svakheter, muligheter og begrensninger. Det ville vært veldig interessant å se forsøk på å gjennomføre en flermålsanalyse for batterisystemer for andre bruksområder av helt annen art. Det kan hjelpe på forståelsen hos alle parter for hvilke batteriteknologier som er mest egnet for det enkelte bruksområdet og hvilke batteriteknologier som har potensial til å bli den beste batteriteknologien, i fremtiden, for sitt bruksområdet.

Referanser

- [1] Det Kongelige Klima- og Miljødepartement: *Klimaplan for 2021-2030*. 2021.
- [2] NVE: *LANGSIKTIG KRAFTMARKEDSANALYSE 2021 – 2040*. 2021.
- [3] Gregori, G., S. Meini, Y. Ménière, J. P. Rodríguez, I. Rudyk (EPO) S. Bennett, N. Johnstone og L. Munuera (IEA): *Innovation in batteries and electricity storage*. 2020.
- [4] Dell, R. M. og D. A. J. Rand: *Understanding Batteries*. 2001.
- [5] Petrovic, S.: *Battery Technology Crash Course*. 2021.
- [6] Kallevik, T., J. Tjersland, L. E. Eilifsen, Å. G. Tveten, H. S. Fadum, K. Ness og R. A. Nordeng: *Driften av kraftsystemet 2019*. 2020.
- [7] Statnett: *Rapport fra systemansvarlig 2021*. 2022.
- [8] Birkeland, I. G., T. Kallevik, H. B. Kvandal og M R. Brubæk: *Driften av kraftsystemet 2021*. 2022.
- [9] Statnett: *Introduksjon til reservemarkedene*. Hentet: 03.04.23. <https://www.statnett.no/for-aktorer-i-kraftbransjen/systemansvaret/kraftmarkedet/reservemarkeder/introduksjon-til-reserver/>.
- [10] Statnett: *Fast Frequency reserves - FFR*. Hentet: 05.04.23. <https://www.statnett.no/for-aktorer-i-kraftbransjen/systemansvaret/kraftmarkedet/reservemarkeder/ffr/>.
- [11] *European Network of Transmission System Operators For Electricity*. Technical Requirements for Fast Frequency Reserve Provision in the Nordic Synchronous Area – External document, 2021.
- [12] NVE: *Energistatus*. 2010.
- [13] Gunnerød, J. L., D. Vagner, R. Korneliussen, K. Wold, E. T. Bøhnsdalen, L. Christiansen, K. Storaker, L. Zafoschnig, L. M. Hytten og A. Kringstad: *Langsiktig markedsanalyse Norge, Norden og Europa 2022-2050*. 2023.
- [14] SSB: *Elektrisitetens økonomiske utvikling*. Hentet: 24.04.23. <https://www.ssb.no/statbank/table/11011/>.
- [15] Wrålsen, B. og B. Faessler: *Multiple Scenario Analysis of Battery Energy Storage System Investment: Measuring Economic and Circular Viability*. 2022.
- [16] Abbas, Qasa, Mojtaba Mirzaeian, Michael R.C Hunt, Peter Hall og Rizwan Raza: *Current State and Future Prospects for Electrochemical Energy Storage and Conversion Systems*. 2020.
- [17] Jiang, H. R., J. Sun, L. Wei, M. Wu, W. Shyy og T. Zhao: *A high power density and long cycle life vanadium redox flow battery*. 2020.
- [18] Lee, Youngsik Kim · Wang-geun: *Seawater Batteries - Principles, Materials and Technology*. 2022.
- [19] Jordanger, I., S. Malerud, H. Mincken og A. Strand: *Flermålsanalyser i store statlige investeringsprosjekt*. 2007.

- [20] Finansdepartementet: *Systematisk usikkerhet*. 2008.
- [21] Berg, T.: *Grunnleggende økonomistyring*. 2021.
- [22] PwC og Forening for finansfag Norge: *Risikopremien i det norske markedet | Desember 2022*. 2022.
- [23] Economics, Trading: *Norge - 10-årig statsobligasjon*. Hentet: 09.05.23. <https://no.tradingeconomics.com/norway/government-bond-yield>.
- [24] Finansdepartementet: *Karbonprisbaner for bruk i samfunnsøkonomiske analyser*. Hentet: 20.04.23. <https://www.regjeringen.no/no/tema/okonomi-og-budsjett/statlig-okonomistyring/karbonprisbaner-for-bruk-i-samfunnsokonomiske-analyser/id2878113/>.
- [25] Vullum-Bruer, F., K. O. P. Bjørgen, H. Kaiko, H. Svendsen og A. Sevault: *Konseptutredning - Fleksible løsninger for energilagring ved Tiller vgs*. 2021.
- [26] Melin, H. E.: *Analysis of the climate impact of lithium-ion batteries and how to measure it*. 2019.
- [27] Han, X., L. Lu, Y. Zheng, X. Feng, Z. Li, J. Li og M. Ouyang: *A review on the key issues of the lithium ion battery degradation among the whole life cycle*. 2019.
- [28] Eaton: *Eaton 9395XC UPS, 2022. Datablad*.
- [29] Tesla: *Tesla Powerwall Specifications, 2019. Datablad*.
- [30] Tesla: *Tesla Powerwall Specifications, 2021. Datablad*.
- [31] Visblue: *Visflow Container Module Specifications, I.D. Datablad*.
- [32] Colthorpe, A.: *First phase of 800 MWh world biggest flow battery commissioned in China*. Hentet: 11.05.23. <https://www.energy-storage.news/first-phase-of-800mwh-world-biggest-flow-battery-commissioned-in-china/>.
- [33] Hiremath, M., K. Derendorf og T. Vogt: *Comparative Life Cycle Assessment of Battery Storage Systems for Stationary Applications*. 2015.
- [34] GreenRock: *User Manual GreenRock, I.D. Brukermanual*.

A Begrunnelse for alternativenes verdier

En sentral del av å sammenligne de ulike alternativene i flermålsanalysen var å estimere verdier til de ulike batterisystemene til de ulike evalueringskriteriene. I dette vedlegget er verdiene i tabell 13 blitt gjennomgått og en kort begrunnelse for disse blir gitt.

A.1 Li-ionbatterisystem

I forbindelse med utredningen utført av Sintef sin ”Konseptutredning Konseptutredning - Fleksible løsninger for energilagring ved Tiller vgs” ble det innhentet et prisestimat fra Eaton, som er en leverandør av li-ionbatterisystem [25]. Der er det innhentet et prisestimat som tilsvarer 5,3 MNOK per MWh. Det blir antatt at batterisystemet vil kunne vare 6000 sykluser og 10-20 år [25]. Hvis en antar 6000 sykluser og at batterisystemet gjennomgår en syklus hver dag, vil en få 16 år levetid som også er estimert levetid for li-ionbatterisystemet for denne oppgaven. Prisestimatet som er innhentet fra Eaton er for et batteri på 100 kW. I denne flermålsanalysen, er alle systemene skalert opp til et batterisystem med kapasitet på 1,0 MWh. Med et batterisystem med 450 kWh, vil effekten per MWh være 0,22 MW. Levetiden på 6000 sykluser er antatt å oppnås med en DoD på 0,80. I følge utredning til Sintef vil et li-ionbatterisystem ha en energitetthet på mellom 80 og 100 kWh/m³ [25]. Det gjør at et batterisystem vil oppta omkring 11 m³ per MWh. En degradering på 1,0 % hvert år er kun en antagelse.

Effektivitet til batterisystemet er ikke oppgitt i konseptutredningen til Sintef og det har ikke lyktes å finne datablad eller annen informasjon om batterisystemet. På hjemmesiden til Eaton kan en finne andre li-ionbatterisystemer, blant annet Eaton 9395XC UPS som har en effektivitet på opp mot 97,5 % [28]. Datablad for Teslas powerwall, som er basert på li-ionbatterier fra 2019 og 2021 viser begge en effektivitet på 90 % [29] [30]. Med dette som utgangspunkt antas effektiviteten til li-ionbatterisystemet i flermålsanalysen å være 90 %.

Li-ionbatterier anses å være den mest modne batteritypen blant alternativene. De har vært i kommersielt brukt en god stund, og en stoler på at teknologien holder like lenge som leverandører anslår. Det finnes flere leverandører av stasjonære batterisystemer til bruk som ligner på bruken i denne oppgaven [25]. Den systematiske usikkerheten for alle batteriene antas å være lik, men den usystematisk usikkerheten varierer. I delkapittel 2.5.3 så ble det vist til at den 10-årige statsobligasjonen, som per 9.mai 2023 var på 3,2 %, kan benyttes som risikofri rente og kan dermed ses på som et gulv for diskonteringsrente. Uten så mye mer dypdykking for å finne best mulig diskonteringsrente, ble denne satt til å være 5,0 % for li-ionbatterisystem. I tabell 8 og i resten av resultatdelen kommer diskonteringsrenten til uttrykk som usikkerhet.

For miljøkriteriet er det vanskelig å komme med gode klimapåvirkningsestimater. Hans Eric Melin kommer frem til 73 kg CO₂/kWh, som også er det Sintef bruker i sin konseptutredning [26], [25]. Dette tallet vil kunne endres i fremtiden ettersom verdikjeder stadig er i forandring og energimiksen til energien som går med på å produsere batterisystemer blir bestående av utslippsfri kraftproduksjon.

A.2 VRFB-system

I konseptutredning til Sintef ble det innhentet et prisestimat fra Visblue på VRFB-system som tilsvarer 5,0 MNOK/MWh. Dette var ekskludert invertere, så det ble antatt en pris på 6,0 til 7,0 MNOK/MWh, som gir grunnlag for å bruke 6,5 MNOK som pris for et batterisystem på 1 MWh

[25]. Visblue sitt datablad for deres kontainermodul, viser at modulen er designet for å vare 20 000 sykluser [31]. Det står samtidig at modulen er designet for 20 år. Hvis modulen blir utladet og oppladet en gang hver dag, vil det med 20 000 sykluser kunne vare i 55 år. Med dette som utgangspunkt ble det antatt en levetid på 26 år for batterisystemet, men det er forbundet mye usikkerhet ved dette estimatet. Kontaineren har en effekt på 40 kW og lagringskapasitet på 200 kWh, som gir 200 kW, hvis en skalerer opp til 1 MWh [31]. Effektiviteten er gitt å være 80 % [31]. Kontaineren har en energitetthet på 5,2 kWh/m³ som gir et volum på 192 m³ for et batterisystem på 1 MWh. Det er anbefalt å lade ut og opp batterisystem mellom 10 og 80 % som gir en DoD på 0,70 [25]. Degradering er antatt å være 0,2 % hver år.

Redoks flybatterisystemer vurderes til å være en noe mer umoden teknologi enn li-ionbatterisystemer. VRFB-systemer har blitt forsket en god del på og har de siste årene blitt mer kommersielt tilgjengelig. I 2022 ble blant annet et 800 MWh VRFB innstallert i Kina [32]. Bryte er oppstartsbedrift som ønsker å spesialisere seg på batteritypen [25]. Invinity Energy Systems og Visblue tilbyr også VRFB-systemer og det finnes flere prosjekter i verden som bruker VRFB-systemer som sitt batterisystem. Med dette som bakgrunn vurderes en diskonteringsrente til å være 6 %, 1 %-poeng høyere enn li-ionbatterisystemet.

I artikkelen ”Comparative Life Cycle Assessment of Battery Storage Systems for Stationary Application” hvor de sammenlignet fire stasjonære batterisystemers globale oppvarmingspotensial (GWP), kom de frem til at VRBF hadde en GWP tilsvarende li-ionbatterier [33]. Med utgangspunkt i dette, ble 73 kg CO₂/kWh antatt for redoks flybatterisystemet, i likhet med li-ionbatterisystemet.

A.3 Saltvannsbatterisystem

I konseptutredningen til Sintef ble det vist til en rapport fra Eikeli som viste en kostnad på 750 Euro per kWh [25]. Med en antatt kurs på 10 kr/Euro og et batterisystem på 1 MWh, kan en anta en pris på 7,5 MNOK. I konseptutredningen har de funnet at batteriet er oppgitt til å levere 0,2 C, som tilsvarer 0,2 MW hvis en skalerer batteriet opp til 1 MWh. Batteriet skal kunne holde 5000 sykluser med en DoD på 0,80 og levetid på 15 år [25]. Etter 15 år skal gjenværende kapasitet være 70 %, som gir en årlig degradering på 2,4 %, hvis en antar lik prosentvis degradering hvert år i 15 år. En brukermanual som GreenRock har lagt ut, er batterisystemene i manualen stort sett oppgitt til å ha en effektivitet på 90 % [34]. Dette er ved lave verdier for ut-og oppladning. Batterier har ofte en lavere effektivitet ved høyere effekter [4]. Dermed antas en noe mer konservativ effektivitet på 85 %. Et batterisystem på 120 kWh blir estimert å trenge 7,5 m³, som gir 63 m³ for et batterisystem på 1 MWh [25].

Saltvannsbatterier, er batteritypen som anses å være minst kommersielt utbredt blant alternativene i denne oppgaven. Det finnes ingen leverandør av slike batterier i Norge og BlueSky Energy er eneste leverandør som er oppdaget i Europa av undertegnede. Dette kan medføre utfordringer med at service og fremtidig oppfølging av et potensielt batterisystem kan bli mer utfordrende og kostbart. Dette bidrar med en betydelig usikkerhet. Flere av estimatene i denne oppgaven er basert på en rapport som er basert på en annen rapport. Med dette som bakgrunn blir diskonteringsrenten satt til 7,5%, høyest blant alternativene. Ved å innhente mer informasjon kan estimatene bli mindre usikre, men det er ikke gitt at denne informasjon gir oppløftende estimeringen for saltvannsbatterisystem. Saltvannsbatterier anses å ha lavt karbonavtrykk [25]. Noe vilkårlig ble miljøkonsekvensen antatt å være 20 kg CO₂/kWh.

A.4 Li-ionbatterisystem (brukt)

For li-ionbatterisystem (brukt) vil kun de egenskapene som antas å avvike fra li-ionbatterisystemet (nytt) beskrives. For resten av egenskapene, se vedlegg A.1.

Det ble i Sintef konseptutredning innhentet et prisestimat på 3000 NOK/kWh, som tilsvarer 3,0 MNOK for et batterisystem på 1 MWh [25]. En stor forskjell på nye og brukte li-ionbatterisystemer er at brukte li-ionbatterisystemer har en vesentlig lavere energitetthet. Kapasiteten til batteriene har blitt redusert samtidig som energitettheten på material- og systemnivå for nye batterisystemer har økt betraktelig. Brukte li-ionbatterisystemer som ble satt sammen for kanskje flere år siden vil på grunn av dette ha lavere energitetthet [25]. Med en energitetthet på 50-60 % av li-ionbatterisystemet antas et volum på 22 m³, dobbelt så stort som et nytt li-ionbatterisystem. Batterisystemet ble i Sintef sin konseptutredning estimert til å kunne ha en levetid på 5-10 år og 4000 sykluser [25]. 4000 sykluser tilsvarer en levetid på 11 år hvis en regner med en syklus er dag, som også er estimert brukt i denne oppgaven.

Å benytte brukte li-ionbatterier er fortsatt ganske nytt på markedet og det er ikke enkelt å si noe helt eksakt om miljøavtrykket til brukte li-ionbatterisystemer. Hans Eric Melin skriver i en rapport, publisert av Circular Energy Storage, at 75% av energiforbruket som går med på å lage en batteripakke, blir brukt battericelleproduksjon [26]. Med bakgrunn i dette estimeres, med stor usikkerhet, et miljøavtrykk som tilsvarer 18 kg CO₂/kWh. Li-ionbatterier er en kjent og etablert teknologi. Brukte Li-ionbatterier er derimot mer usikkert. Det finnes flere leverandører av brukte li-ionbatterisystemer [25]. Mye av verdien til brukte li-ionbatterisystemer ligger relativt få år i fremtiden, siden levetiden er estimert til å være relativt lav. Dette gir en lavere usikkerhet enn ved de andre batterisystemene, som er estimert å ha en lengre levetid. Det ble i denne oppgaven antatt en diskonteringsrente og usikkerhet på 5,5%, som er nest lavest av alternativene i denne oppgaven. Resten av verdiene er estimert å være like som nye li-ionbatterisystemer, men med en høyere usikkerhet forbundet ved seg.

B Script

B.1 Kode del 1

```
def battery_NNV(Pris_Batteri_system=5300000, Kapasitet=1000, Power_output=0.222, Levetid=16, Volum = 11, Effektivitet =0.85,
               Degradering=0.01, DoD=0.80, Usikkerhet=1.05, DK=10000, Pris_høy = 1.4, Pris_lav = 0.4,
               Kostnad_MMM = 50
               ,FFR_inntekt_per_år_per_MW=202500*1.05):
    """ En funksjon som regner ut totale FFR-inntekter, arbitrasjeinntekter og NNV til et batteri på 1 MWh. """
    # Pris_batteri_system er prisen på batterisystemet som analyseres
    # Kapasitet angir hvor mange kilowattimer batteriet har tilgjengelig
    # Power_output angir hvor mange megawatt batteriet kan levere maksimalt
    # Levetid er antall år batteriet er forventet å kunne operere til bruksområdet
    # Volum er størrelsen til batteriet målt i kubikkmeter
    # Eta er hvor effektivt et batteri er mellom 0.00 og 1.0. Ganget med 0,85 som er tapene til systemet utenfor battericellen
    # Degradering angir hvor mye kapasiteten taper seg hvert år.
    # DoD angir hvor mye av kapasiteten som kan utnyttes
    # Usikkerhet angir hvilken tall som brukes for å diskontere kontantstrømmer. Jo høyere usikkerhet rundt verdiene til
    # batterisystemet, jo høyere usikkerhet.
    # DK er en driftskostnad anslått at batteriet kommer til å ha etter år 10.
    # Pris_høy anslår hvilken pris et batterisystem kan få for energien sin
    # Pris_lav anslår hvilken pris et batterisystem kan kjøpe energien sin for
    # Kostnad_MMM anslår lagerkostnaden for hver kubikkmeter batteriet opptar. Degradering er holdt utenfor her.
    # FFR_inntekt_per_år_per_MW er inntekten man kan regne med fra FFR per megawattime man selger. 202500 er
    # hentet fra prisen i 2023 og 1.05 er forventet økning til første året etter at et batteri er installert. Deretter går
    # endres økningen til 1.02.
    Power_output = Power_output * 0.85
    C_t = (Kapasitet*DoD) / (Power_output * 1000) # C_t er tiden det tar å lade opp batteri fra maksimum DoD til 100% fullading
    first_digit = int(str(C_t)[0]) # Mellomsteg for å regne ut straff
    Straff = first_digit - 1 # Regner ut straff. For hver time, utover 1 time, batteriet bruker å tømme batteriet, antas
    # batterisystemet å oppnå 2,5 prosent lavere pris_høy og 1,0 prosent høyere pris_lav

    NNV_alle_kontantstrømmer = 0 # NNV for alle kontantstrømmer
    NNV = 0 # NNV før noen kontantstrømmer er lagt til
    Totale_arbitrasjeinntekter = 0 # Oppsamlingsvariabel for å se totale arbitrasjeinntekter
    Totale_FFR_inntekt = 0 # Oppsamlingsvariabel for å se totale FFR_inntekter
    Pris_høy_batteri = Pris_høy * ((0.975)**(Straff))
    #For hver time ekstra man bruker på å lade opp fra DoD til 100%, antas Pris_høy og reduseres med 2.5%
    Pris_lav_batteri = Pris_lav * ((1.01)**(Straff))
    # Tilsvarende for Pris_lav er en økning på 1.0%
    Levetid = int(Levetid)

    for year in range(Levetid):
```

Figur 22: Figuren viser del 1 av hvordan ulike egenskaper, dets verdier og parametere er estimert å påvirke NNV

B.2 Kode del 2

```
for year in range(Levetid):

    FFR_inntekt_per_år = FFR_inntekt_per_år_per_MW * Power_output # Utregning og oppdatering av FFR_inntekt_per_år
    NNV += (FFR_inntekt_per_år) / ((Usikkerhet)**(year+1)) # Kontantstrøm fra FFR hvert år
    Totale_FFR_inntekt += (FFR_inntekt_per_år) / ((Usikkerhet)**(year+1)) # Oppsamlingsvariabel for å se totale FFR-inntekter
    arbitrasjeinntekt_per_dag = Pris_høy_batteri * Kapasitet * DoD - ((Pris_lav_batteri * Kapasitet * DoD)/(Effektivitet))
    #Estimert arbitrasje inntekt hver dag
    if arbitrasjeinntekt_per_dag >= 0: # Hvis netto arbitrasjeinntekten er negativ, bør batteriet ikke kjøpe og selge energi
        arbitrasjeinntekt_per_år = (arbitrasjeinntekt_per_dag * 365) / ((Usikkerhet)**(year+1)) # Estimert arbitrasjeinntekt
        # hvert år
        Totale_arbitrasjeinntekter += arbitrasjeinntekt_per_år # Oppsamlingsvariable for å se totale arbitrasjeinntekter
        NNV += arbitrasjeinntekt_per_år / ((Usikkerhet)**(year+1)) # Diskontert arbitrasjeinntekt hver år
    Kapasitet = Kapasitet *(1 - Degradering) #Degradering av batteriet som skjer hvert år
    if year + 1 <= 10:
        FFR_inntekt_per_år_per_MW = 202500 * ((1.05)**(year+1)) # FFR_inntekten øker med 5 prosent hvert
        # år frem mot midten av 2030-tallet.
    else: # Etter 10 år, så innføres en driftskostnad på DK
        NNV += - DK/((Usikkerhet)**(year+1)) # Årlig driftskostnad diskontert
        FFR_inntekt_per_år_per_MW = 202500 * ((1.02)**(year+1)) # Øker med 2 prosent fra og med midten av 2030-tallet
        NNV += (-Volum * Kostnad_MMM) / ((Usikkerhet)**(year+1)) #Årlig Lagerkostnad på Kostnad_MMM diskontert

NNV = NNV - Pris_Batteri_system # Regner ut NNV med alle kontantstrømmmer minus prisen på batterisystemet
print(NNV)
```

Figur 23: Figuren viser del 2 av hvordan ulike egenskaper, dets verdier og parametere er estimert å påvirke NNV

Figurene 22 og 23 viser tilsammen hvordan NNV ble estimert for valgte verdier på kriterier og andre estimeringer som ble gjort. Ved å kjøre koden med mange forskjellige verdier av et evalueringskriteriet mens de alle andre verdier ble holdt konstant, fikk en kommet frem til resultatene i kapittel 4

C Egenskaper som ikke ble tatt med

Det er hundrevis av egenskaper som påvirker hvor godt et batterisystem er. Egenskaper som skal være med i en flermålsanalyse bør være egenskaper som kan oppnå en stor vekt, som kan påvirke valg av batterisystem og som varierer fra alternativ til alternativ. Det finnes noen egenskaper som en kunne argumentert for burde vært en del av denne flermålsanalysen, som ikke er tatt med. Noen av disse vil bli nevnt i dette vedlegget. Det understrekes av undertegnede at det finnes flere andre egenskaper som kunne vært inkludert, som heller ikke er nevnt her.

C.1 Batteristyringssystem

Et batterisystem trenger et godt batteristyringssystem (BMS). Et godt BMS kunne vært et kriterie i denne oppgaven, som mest sannsynlig ville fått høy vektning. En grunn til at BMS ikke er inkludert, er fordi BMS i mange tilfeller er en bakenforliggende årsak til flere av verdiene til egenskapene inkludert i denne oppgaven. For eksempel så påvirker BMS levetid, DoD, og effekt. Dermed anses BMS sin verdi, å komme til uttrykk gjennom egenskapene som allerede er involvert i flermålsanalysen. En annen grunn til at BMS ikke er involvert er fordi det er anatt for krevende å skulle få tak i tilstrekkelig med informasjon til å kunne gjøre en reell vurdering av ulike BMS i denne oppgaven.

C.2 Sikkerhet

Sikkerhet er en annen veldig viktig egenskap. Det har blitt ansett som en forutsetning for at et batterisystem er involvert i en beslutningskontekst at sikkerheten til et batterisystem er tilstrekkelig god. I egenskapen usikkerhet vil sikkerheten til et batterisystem komme noe til uttrykk. Når god sikkerhet allerede er et premiss for å bli vurdert, og de alle alternativene har et nivå av sikkerhet som er på et tilstrekkelig nivå, har det ført til at denne egenskapene også er ekskludert

C.3 Topp opp- og utladning

Etter at resultatene var ferdigstilt ble det oppdaget at VRFB kontaineren til Visblue hadde en egenskap som het "Peak charge/discharge power" som kan oversettes til topp opp- og utladning på norsk [31]. Dette er en egenskap som tillater batterisystemet å lade ut eller opp batteriet fortere enn det batteriet er laget for å gjøre over tid. Dette er en egenskap som gjør at en kan tilby 50 % mer FFR til Statnett. Om et batterisystem har en slik egenskap eller ikke og hva størrelse på denne egenskapen er, kan definitivt påvirke hvilket batterisystem som er best egnet til å balansere kraftsystemet i Norge. Skulle undertegnede gjennomført en tilsvarende flermålsanalyse som i denne igjen, ville denne egenskapen blitt vurdert å inkludere som et evalueringskriterie.

C.4 Effektivitet ved ulik utladningshastighet

Batterier har ulik effektivitet ved ulike utladningshastigheter [5]. Ved lave utladningshastigheter så er tapene små. Når utladningshastigheten øker, vil effektiviteten gå ned, på grunn av økte ohmske tap og at cellene i batteriet ikke klarer å tilføre reaktanter raskt nok i en redoksreaksjon [5]. Denne egenskapen kan nok variere fra batterisystem til batterisystem. Hvis det er en betydelig forskjell på hvor stor endringen i effektivitet et batterisystem har ved forskjellig utladningshastighet, bør dette inkluderes i en fremtidig flermålsanalyse. Hvis det ikke er en så stor forskjell kan denne egenskapen eventuelt ekskluderes hvis det ender opp med å få en veldig lav vektning.



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway