

Jonas Aasland
Anders Remman

Teknisk-økonomisk case-analyse av Bessakerfjellet vindpark

Kan vanadium redoks flytbatterier være
lønnsomt i vindparker?

Bacheloroppgave i Fornybar Energi ingeniør

Veileder: Odne Stokke Burheim og Pauline Zimmermann

Medveileder: Mats Håkon Grøn Jønland og Sindre Solberg

Mai 2021

Jonas Aasland
Anders Remman

Teknisk-økonomisk case-analyse av Bessakerfjellet vindpark

Kan vanadium redoks flytbatterier være lønnsomt i
vindparker?

Bacheloroppgave i Fornybar Energi ingeniør
Veileder: Odne Stokke Burheim og Pauline Zimmermann
Medveileder: Mats Håkon Grøn Jønland og Sindre Solberg
Mai 2021

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for energi- og prosessteknikk



Kunnskap for en bedre verden

Forord

Denne bacheloroppgaven er skrevet av to studenter i emnet TFNE3001 - Bacheloroppgave For-nybar Energi, våren 2021. Gruppens medlemmer studerer siste semester på Fornybar Energi ingeniør ved NTNU i Trondheim.

Oppgaven ble utarbeidet i samarbeid med TrønderEnergi, og omfatter bruken av vanadium redoks flytbatteri som lagringsteknologi on-site i en vindpark. Oppgaven er utført som en teknisk-økonomisk case-analyse med fokus på kostnadsoptimering og energilagring i Bessakerfjellet vindpark. Simuleringer i både Excel og MATLAB ble gjennomført for å undersøke lønnsomhet og nødvendig kapasitet ved utførelse av flere scenarier.

Vi ønsker å rette en takk til veilederne fra NTNU, Odne Stokke Burheim og Pauline Zimmermann, for utmerket oppfølging og veiledning i løpet av denne oppgaven. Vi ønsker også å takke bedriftskontaktene hos TrønderEnergi, Mats Håkon Grøn Jønland og Sindre Solberg for bistand i oppbyggingen, tildeling av data og oppfølging gjennom hele oppgaveprosessen. Videre vil vi takke Bryte AS, ved Brian Stead og Bessart Olluri for gode innspill rundt vanadium redoks flytbatterier. Vi vil rette en stor takk til studieprogramveileder Håvard Karoliussen, som har motivert og undervist alle studentene på Fornybar Energi ingeniørstudiet på en enestående måte de siste tre årene. Til slutt retter vi en takk til venner og familie som har motivert og kommet med inspirerende ord det siste semesteret ved studiet.

Trondheim, 20 mai, 2021


Jonas Aasland


Anders Remman

Sammendrag

Denne oppgaven ser på mulighetene ved å lagre overskuddsenergi fra Bessakerfjellet vindpark, slik at struping av kraft ikke blir nødvendig. I tillegg samkjøres dette opp mot spotpris for å få en maksimal økonomisk gevinst. Ved å skape flere scenarier, utledet i MATLAB, ble det mulig å skape en teknisk-økonomisk case-analyse for å optimalisere vindparker i dag. Problemstillingen oppgaven gir svar på, er om det er lønnsomt med energilagring ved hjelp av et vanadium redoks flytbatteri on-site i en vindpark. Oppgaven ble utledet med en slik tilnærming til problemstillingen at batteriet sees på som et ideelt batteri med uendelig kapasitet.

Scenario 1 ble utledet for å utelukke problemet med struping av overskuddskraft. En algoritme ble utledet for å opprettholde et konstant produksjonsnivå på 30 MWh, og simulert i MATLAB. Resultatene av denne simuleringen viste en solid økonomisk profitt på 5,07 millioner NOK, og samtidig en nødvendig batterikapasitet på 7,15 GWh, som er langt større en dagens standard på vanadium redoks flytbatterier. Scenario 2 baserte seg utelukkende på lagring og salg av produksjon ut ifra spotprisen i det aktuelle elspotområdet. Her ble algoritmen utledet med en begrensning på at all produksjon under 15 €/MWh skulle lagres. Også her viste resultatene en solid økonomisk gevinst på hele 14,45 millioner NOK ved lagring, og en batterikapasitet på 37,30 GWh. Scenario 3 ble utledet som en hybrid mellom scenario 1 og scenario 2. Ved å samkjøre disse scenarioene viste resultatene at det var økonomisk gunstig med en slik løsning. Total økonomisk gevinst i dette scenarioet ble 6,84 millioner NOK. Nødvendig kapasitet i batteriet ble simulert til å være på 14,18 GWh, hvor også dette overskrider dagens standard. Resultatet av simuleringene ble presentert i tabeller og grafer, og sammenlignet med hverandre for å få frem kapasitetsbehovet til batteriet ved de ulike scenarioene. Videre ble Excel brukt opp mot resultatene for å finne kostnadene og eventuelle gevinster knyttet til et simulert vanadium redoks flytbatteri.

Resultatene av de ulike scenarioene viste at en installasjon av et vanadium redoks flytbatteri ved vindparken ville vært utelukkende økonomisk lønnsomt men at det kapasitetsmessig ikke er mulig med dagens batteriteknologi. Det konkluderes med at lagring i vindparker med et vanadium redoks flytbatteri er teoretisk mulig og at det vil gi en god økonomisk gevinst, men at disse batteriene er for store kapasitetsmessig med dagens løsninger.

Summary

This thesis looks at the possibilities of storing surplus energy from Bessakerfjellet wind farm, to avoid throttling of power and in addition coordinate this up to the spot price to get a maximum financial gain. By creating several scenarios that were derived in MATLAB, it became possible to create a technical-economic case analysis to optimize the use of wind energy in wind farms today. The problem this thesis provides an answer to is whether it's profitable to store energy using a vanadium redox flow battery on-site in a wind farm. The thesis was derived with such an approach to the problem that the battery is seen as an ideal battery with infinite capacity.

Scenario 1 was derived to rule out the problem of throttling of excess power. An algorithm derived to maintain a constant production level of 30 MWh was simulated in MATLAB. The results of this simulation showed a solid financial profit of 5.06 million NOK, but at the same time a required battery capacity of 7.15 GWh, which is far greater than the current standard for vanadium redox flow batteries. Scenario 2 was based exclusively on storage and sale of production based on the spot price in the relevant area. The algorithm was derived with a restriction that all production below 15 €/MWh should be stored. The results showed a solid financial gain of as much as 14.45 million NOK on storage, and a battery capacity of 37.30 GWh. Scenario 3 was derived as a hybrid between scenario 1 and scenario 2. By combining these scenarios, the results showed that such a solution was economically beneficial. Total financial gain in this scenario was 6.84 million NOK. Required capacity in the battery was simulated to be 14.18 GWh, which exceeds the current standard. The results of the simulations were presented in tables and graphs, and compared with each other to bring out the capacity requirement for the battery in the different scenarios. Furthermore, Excel was used to compare the results to find costs and any gains associated with a simulated vanadium redox flow battery.

The results of the various scenarios showed that an installation of a vanadium redox flow battery at the wind farm would be exclusively economically profitable, but in terms of capacity it is not possible with the current battery technology. It's concluded that storage in wind farms with a vanadium redox flow battery is theoretically possible and that it will provide a good financial gain, but these batteries are too large in terms of capacity with today's solutions.

Innhold

Forord	i
Sammendrag	ii
Summary	iii
Begrepsliste	vi
Programliste	vii
Figurer	viii
Tabeller	ix
1 Innledning	1
2 Teori	2
2.1 Vindkraft	2
2.1.1 Vindkraft i Norge	2
2.1.2 Flaskehals på Fosen	3
2.2 Bessakerfjellet vindpark	3
2.3 Kraftmarkedet i Norge	4
2.4 Energibehov	8
2.5 Batteriteknologi	9
2.5.1 Energilagringssystemer	9
2.5.2 Vanadium redoks flytbatteri	11
3 Metoder	15
3.1 Produksjon fra Bessakerfjellet vindpark	15
3.2 Spotpris	15
3.3 Generelle antakelser	15
3.4 Scenario 1 - Struping	16
3.5 Scenario 2 - Salg opp mot spotpris	17
3.6 Scenario 3 - Optimering	18
4 Resultat	20
4.1 Produksjon fra Bessakerfjellet vindpark	20
4.2 Spotpris	22
4.3 Scenario 1 - Struping	23
4.3.1 Batterikapasitet	25
4.3.2 Lønnsomhet	26
4.4 Scenario 2 - Salg opp mot spotpris	26
4.4.1 Batterikapasitet	28
4.4.2 Lønnsomhet	29
4.5 Scenario 3 - Optimering	30
4.5.1 Batterikapasitet	32
4.5.2 Lønnsomhet	34

5	Diskusjon	35
5.1	Antakelser	35
5.2	Produksjon	36
5.3	Spotpris	36
5.4	Scenario 1 - Struping	36
5.5	Scenario 2 - Salg opp mot spotpris	38
5.6	Scenario 3 - Optimering	41
5.7	Fremtidig utvikling	43
5.8	Videre arbeid	44
5.9	Feilkilder	44
6	Konklusjon	46
	Referanser	47
A	Algoritme for plot av Bessakerfjellet vindparks 25 turbiner	I
B	Algoritme for plot av parkens månedlige produksjon	III
C	Algoritme for plot av vindstyrke	IV
D	Algoritme for plot av spotpris	V
E	Algoritme Scenario 1	VI
F	Algoritme Scenario 2	VII
G	Algoritme Scenario 3	VIII

Begrepsliste

Båndlagt areal	Prosent bebygd areal i forhold til tomtearealet.
Elektrolytt	Elektrisk ledende væske.
Elspotområde	Kraftprisen i Norge settes for fem regioner som avgrenses av flaskehals i strømmettet.
Engrosmarkedet	Delen av kraftmarkedet hvor det handles med store kvantum elektrisitet. Eksempelvis mellom kraftprodusent og kraftleverandør.
IEA	International Energy Agency.
Kinetisk energi	Bevegelsesenergi.
LCOE	Et mål på kostnaden til en energiproduserende enhet i løpet av dens levetid.
Middelproduksjon	Beregnet gjennomsnittlig årlig produksjonsevne i et kraftverk.
Mtoe	Millioner tonn oljeekvivalenter.
Nacelle	Maskinhuset til en vindturbin.
Nettselskap	Eier og drifter strømmettet i en gitt region.
NordPool	Den fysiske børsen for krafthandel for de nordiske og baltiske landene.
NVE	Norges vassdrags- og energidirektorat.
Oksidasjonstall	Mål på antall elektroner atomet har i en forbindelse, sammenlignet med hva det har som et rent grunnstoff.
On-site	Området tilhørende kraftverket.
Off-grid	Enheter som er uavhengig av eksisterende infrastruktur.
Polymer	Naturlige og syntetiske materialer med ulik sammensetning.
Primærbatteri	En utladingssyklus.
Redoks	Kjemisk reaksjon der ladingen til et stoff blir redusert og ladingen til et annet stoff blir oksidert.
Sekundærbatteri	Oppladbart batteri.
Sluttbrukermarkedet	Delen av kraftmarkedet hvor det handles elektrisitet mellom kraftleverandør og sluttbruker.
Spotpris	En satt pris for elektrisk kraft pr. Wh.
Struping	Stopp i produksjon grunnet kapasitetsmangel.

Programliste

I arbeidet med denne oppgaven ble det brukt flere dataprogrammer. Bruken av programmene i denne listen muliggjorde en teknisk-økonomisk tilnærming av problemstillingen, i tillegg til å løse oppgaver rundt selve rapportteksten.

Excel

Excel er et programmerbart regneark, utviklet av Microsoft. Programmet inneholder celler som kan fylles med tekst, data, og formler. Excel ble brukt som et mellomledd mellom tilsendt data fra Trønderenergi og importering av data i MATLAB. Programmet ble også brukt til den økonomiske analysen i oppgaven, samt til å noe bearbeidelse av produksjons-, spotpris- og vinddata. [1]

MATLAB

Matrix Laboratory, forkortet MATLAB, er et amerikanskutviklet program. Det er en programvare som muliggjør matematisk programmering av formler. MATLAB ble brukt til den tekniske analysen i oppgaven. Det ble utviklet flere algoritmer i MATLAB, som gikk gjennom all dataen, gjorde tekniske beregninger og plottet grafer. [2]

L^AT_EX

L^AT_EX er et høykvalitets skriveprogram utviklet for skriving og publisering av tekniske og vitenskapelige rapporter. L^AT_EX er blir brukt for publisering av vitenskapelige dokumenter. L^AT_EX muliggjør samarbeid mellom flere personer i et dokument på en enkel og godt fungerende måte. Programmet har blitt brukt til skrive delen av oppgaven. [3]

Zotero

Zotero er et research-program utviklet av Corporation for Digital Scholarship, en ideell organisasjon som jobber for å utvikle software og tjenester for forskere og kulturelle institusjoner. Zotero er laget for å hente og sortere kilde data fra nettsider, slik at kildekoden enkelt kan importeres til ønsket skriveprogram. Det er også dette Zotero har blitt benyttet til i arbeidet med denne oppgaven. [4]

Brackets

Brackets er en text-editor utviklet av Adobe. Programmet er i hovedsak utviklet for web-designere og font-designere, for en enkel og oversiktlig måte å programmere nettsider på. I denne oppgaven ble Brackets brukt til å åpne kildekoder importert i Zotero, slik at kildekoden videre kunne importeres i L^AT_EX og henvises til i teksten. [5]

Figurer

2.1	Mengde produsert vindenergi for ulike land i Europa. [8]	2
2.2	Produksjon av vindkraft i Norge fra 2010 til 2020. [9]	3
2.3	Enkel skisse av hvordan kraftmarkedet i Norge henger sammen. [14]	4
2.4	Fremstilling av hvordan Norge er delt inn i fem elspotområder. Bildet er hentet fra Energifakta Norge [14], og modifisert.	6
2.5	Illustrasjon av hvordan el-sertifikatmarkedet fungerer. [24]	7
2.6	Global energiforsyning og globalt forbruk av elektrisk energi fra 1990 til 2018. Bildet er hentet fra IEA's hjemmesider [27], og modifisert.	8
2.7	Globalt energiforbruk, primærenergi målt i exajoule [EJ]. [28]	9
2.8	Sammenligning mellom effektivitet og levetid for ulike energilagringssystemer. [30]	11
2.9	Oppbygningen av et vanadium redoks flytbatteri. [21]	11
2.10	Illustrasjon av den regenerative brenselcellen. [29]	12
2.11	Kostnaden per kWh lagret i et vanadium redoks flytbatteri, gitt i USD i 2017. [34]	14
4.1	Alle parkens turbiners produksjon de første 24 timene i 2020.	20
4.2	Total gjennomsnittlig produksjon for månedene i 2020.	21
4.3	Gjennomsnittlig vindstyrke for hver måned i 2020.	22
4.4	Spotprisen hver time i hele 2020.	22
4.5	Gjennomsnittlig spotpris hver måned i 2020.	23
4.6	Simulering av totalt lagret energi i batteriet, i scenario 1, gjennom året 2020.	25
4.7	Simulering av totalt lagret energi i batteriet, i scenario 2, gjennom året 2020.	29
4.8	Simulering av totalt lagret energi i batteriet, i scenario 3, gjennom året 2020.	33

Tabeller

2.1	Fordele, ulemper, kapasitet og utladingstid for ulike energilagringssystemer. [30]	10
4.1	Vindparkens totale produksjon hver måned i 2020.	21
4.2	Vindparkens totale produksjon de seks første timene i 2020.	23
4.3	Opplading og utlading av batteriet i scenario 1 de seks første timene i 2020.	24
4.4	Første periode med null produksjon fra vindparken i 2020, tilhørende scenario 1.	24
4.5	Utlading av batteriet i scenario 1 ved produksjonsstopp.	24
4.6	Første fullstendige utlading av batteriet i scenario 1 i 2020.	25
4.7	Mengden energi i batteriet i scenario 1 ved de seks første timene i 2020.	25
4.8	Nødvendig kapasitet på installert batteri i scenario 1.	26
4.9	Økonomisk gevinst ved lagring i batteriet, i scenario 1, for 2020.	26
4.10	De seks første timene med produksjon i 2020, tilhørende scenario 2.	27
4.11	Spotprisen de seks første timene i 2020.	27
4.12	Spotprisen i døgnskiftet 1. til 2. januar 2020.	27
4.13	Vindparkens produksjon ved første utlading, tilhørende scenario 2 i 2020.	27
4.14	Lagring og salg av produksjon i scenario 2, i døgnskiftet 1. til 2. januar 2020.	28
4.15	Lagring og salg av produksjon i scenario 2, etter periode i 2020 med mye lagring.	28
4.16	Energimengde i batteriet i scenario 2, på et vilkårlig tidspunkt i 2020.	28
4.17	Nødvendig kapasitet på installert batteri i scenario 2.	29
4.18	Økonomisk fortjeneste i scenario 2 ved salg av produksjon i 2020.	30
4.19	Lagring og utlading i scenario 3 de seks første timene i 2020.	30
4.20	Vindparkens produksjon noen timer i april 2020.	31
4.21	Spotprisen noen timer i april 2020.	31
4.22	Lagring og utlading i scenario 3 noen timer i april 2020.	31
4.23	Lagring og utlading i scenario 3 noen timer i mai 2020.	32
4.24	Produksjon og spotpris noen timer i mai 2020.	32
4.25	Energimengde i batteriet i scenario 3, tidlig januar 2020.	32
4.26	Lagring og salg av produksjon i scenario 3, tidlig januar 2020.	33
4.27	Nødvendig kapasitet på installert batteri i scenario 3.	34
4.28	Økonomisk gevinst i scenario 3, ved lagring i batteriet i 2020.	34

1 Innledning

I takt med befolkningsvekst, økt levestandard, og utbygging av industri, øker verdens energibehov. Fossile energikilder er ikke en bærekraftig løsning, og klimautfordringene krever at større deler av verdens energiforsyning kommer fra fornybare energikilder. Vindenergi er en løsning som allerede er godt utbredt, og er en del av løsningen på en bærekraftig fremtid. Kapasiteten på kraftnettet, ut fra flere områder bestående av flere vindparker, er i dag ikke stor nok til at alle parkene kan produsere for fullt. Dette medfører at parker enkelte steder er nødt til å strupe deler av kraftproduksjonen for å unngå å overskride kraftnettets kapasitet. Målet med oppgaven er derfor å undersøke om vindparker hvor slike situasjoner inntreffer, kan optimaliseres ved hjelp av lagring av overskuddsproduksjon som ellers ville blitt strupet. I oppgaven er det brukt vanadium redoks flytbatteri som energilagringssystem.

I første omgang presenteres relevant teori i teoridelen. Her nevnes blant annet generell vindkraft, samt vindkraft i Norge. Videre nevnes Bessakerfjellet vindpark, før kraftmarkedet i Norge beskrives. Flaskehalsen på kraftnettet ut fra Fosen blir også nevnt, da det er dette oppgaven har bygget en case på. Det økende energibehovet i verden omtales, før batteriteknologier, energilagringssystemer og vanadium redoks flytbatterier blir beskrevet.

Videre i rapporten beskrives prosessen med å samle data og hvordan dette ble gjort, samt hvilke undersøkelser som ble gjort i metoder. I denne delen beskrives det hvordan de ulike dataene ble gjennomgått, og hvordan algoritmene i MATLAB ble utviklet for å gi svar på spørsmålene det var ønskelig å undersøke.

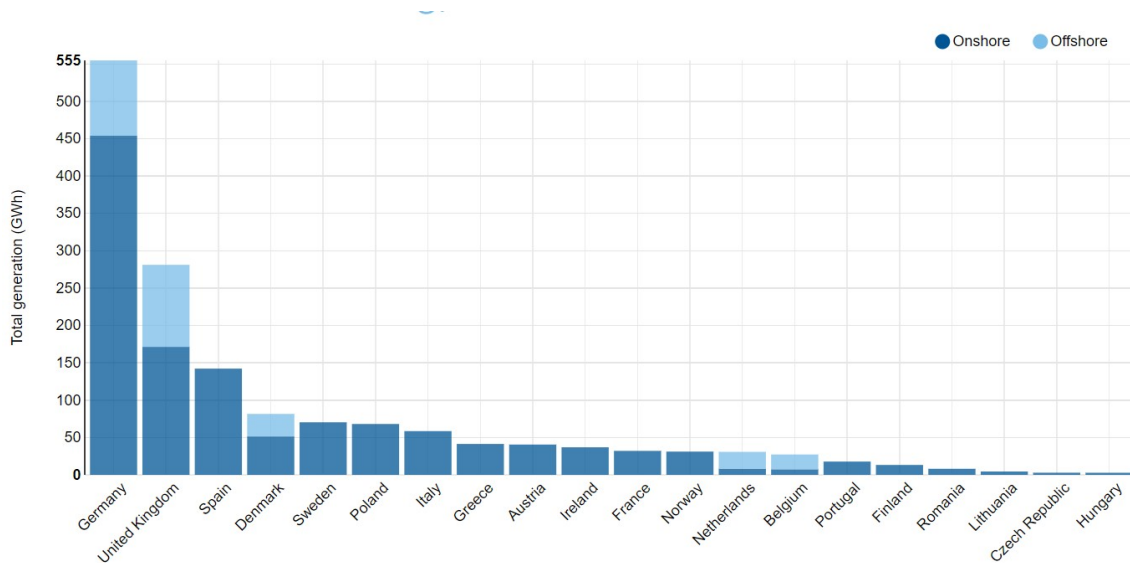
I resultatdelen presenteres resultatene gruppen har kommet frem til ved hjelp av MATLAB og Excel. Resultatene presenteres som enten tabeller, grafer eller illustrerende figurer. I diskusjonsdelen diskuteres det rundt resultatene, hvor deler fra teori trekkes inn for å underbygge påstander. Til slutt trekkes det en konklusjon ut fra det gruppen har undersøkt og funnet. Det konkluderes med om en installasjon av et vanadium redoks flytbatteri on-site i vindparker kan være en mulig løsning på problemet med struping av kraft. Det konkluderes også med om dette er teoretisk og praktisk mulig, samt om en slik løsning vil være økonomisk gunstig.

2 Teori

I denne delen av rapporten presenteres det teori innenfor flere fagfelt. Teorien som presenteres vil være relevant for å kunne tolke resultatene fra analysene i Excel og MATLAB. Teorikapittel tar for seg teori rundt kraftmarkedet i Norge og hvordan det er bygget opp, i tillegg til relevant teori vedrørende vanadium redoks flytbatterier.

2.1 Vindkraft

Dagens energibehov er på sitt høyeste noen sinne, i tillegg til at verden er avhengig av å minimere CO₂-utslipp for å sikre bærekraft og unngå global oppvarming. Disse behovene fører til at fornybare energikilder bygges ut i stadig større grad, og vindkraft er i dag den raskest voksende energikilden på verdensbasis. Vindkraft er en teknologi som er i stadig utvikling, og det er i en stor del av verden rimeligere å bygge ut ny vindkraft, fremfor å etablere ny gass- og kullkraft. Vindturbiner utnytter vindens kinetiske energi for å produsere elektrisk kraft. Rotorbladene fanger opp og overfører den kinetiske energien til generatoren i nacellen via en drivaksel. Generatoren produserer elektrisk kraft, som sendes ut på kraftnettet. [6] I dag er det Kina som står for den største andelen av utbygd vindkraft, med 36% av verdens totale vindkraftproduksjon. Neste på listen er USA med 17%, og tallene gjelder for landbasert vindkraft. [7] I Europa er det Tyskland og Storbritannia som står for mesteparten av produsert vindkraft. Figur 2.1 viser hvordan installert vindkraftproduksjon er fordelt i Europa. [8]

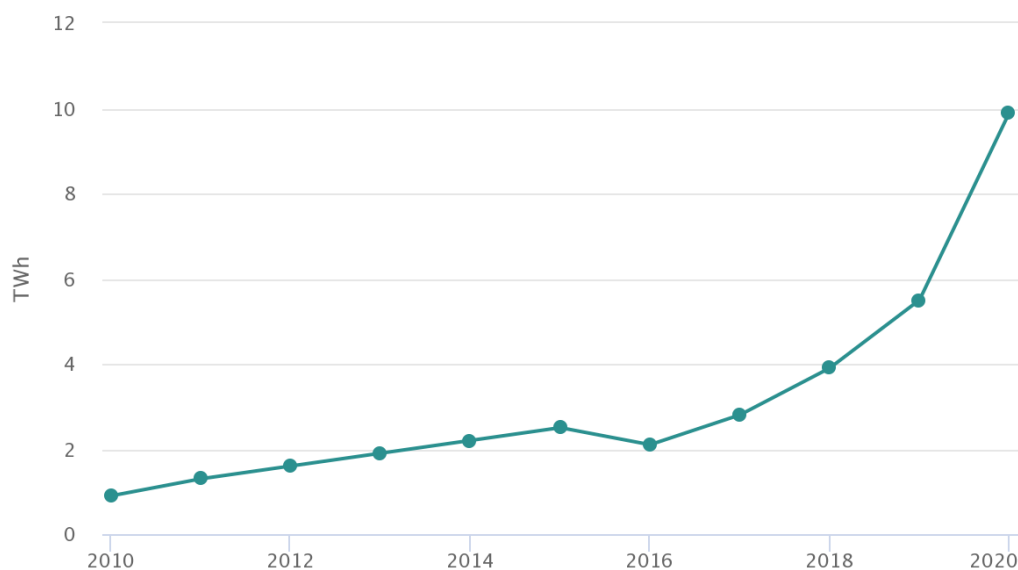


Figur 2.1: Mengde produsert vindenergi for ulike land i Europa. [8]

2.1.1 Vindkraft i Norge

De siste årene har det vært stor utbygging av vindkraft i Norge. Siden 2017 har det blitt satt ny produksjonsrekord hvert år, og i 2020 var det i Norge 70% høyere vindkraftproduksjon enn i 2019. I 2020 stod vindkraft for 6,4% av den totale kraftproduksjonen i Norge. Den voldsomme økningen i kraftproduksjon skyldes at det i 2020 ble satt i drift 15 nye vindkraftverk, som til sammen

utgjorde en produksjon på 6,1 TWh. Figur 2.2 viser endringen i norsk vindkraftproduksjon fra 2010 til 2020. I Norge i dag finnes det totalt 53 vindkraftverk, med et samlet antall turbiner på 1164. Dette gir en totalt installert effekt på 3977 MW, og en samlet middelproduksjon på 13065 GWh. [9–11]



Figur 2.2: Produksjon av vindkraft i Norge fra 2010 til 2020. [9]

2.1.2 Flaskehals på Fosen

På Fosenhalvøya er det utbygd flere vindparker, som til sammen kan produsere 780 MWh når alle parkene produserer for fullt. Produksjonen som leveres fra disse parkene leveres til en felles forbindelse, hvor kraften videre distribueres ut på kraftnettet. Forbindelsen ut fra Fosenhalvøya har en begrensning på 750 MWh, og det vil derfor oppstå en flaskehals om alle vindparkene på Fosenhalvøya produserer for fullt. Dette medfører at på tidspunkter hvor alle vindparkene produserer for fullt, vil en eller flere av vindparkene være nødt til å strupe deler av produksjonen sin. Behovet for struping av produksjon vil i størst grad påvirke Storheia vindpark, den største vindparken på Fosenhalvøya. På sensommeren 2021 er det planlagt åpning av en ny vindpark på Fosenhalvøya, Sørmarkfjellet vindpark. Vindparken vil tilføre 130 nye MWh produsert kraft som vil gjøre en flaskehals ut fra fra tilknytningspunktet på Fosen-halvøya mer sannsynlig.

2.2 Bessakerfjellet vindpark

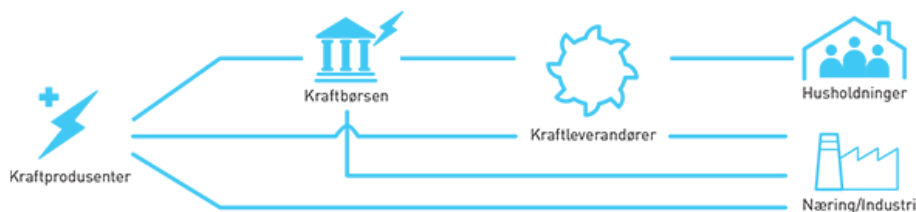
Bessakerfjellet vindpark eies og driftes av Trønderenergi, og er lokalisert i et området med gode vindforhold i Åfjord kommune i Trøndelag. Vindparken stod ferdig i 2008, og var da Norges nest største vindpark. I dag ligger parken som nummer tre på listen. Bessakerfjellet vindpark dekker et båndlagt areal på ca. 3,5km², og består av 25 vindturbiner. Parken har en beregnet produksjonskapasitet på totalt 150 GWh pr. år. Bessakerfjellet vindpark består i tillegg av et drifts- og vedlikeholdssenter og en transformatorstasjon. Kraftoverføringen fra hver enkelte vindturbin skjer via nedgravde kabler i veitraseen. Kablene samles i små nettstasjoner inne i parken, før de føres inn i transformasjonsstasjonen, og på denne måten unngår behovet for å bygge luftlinjer inne i parken. Bessakerfjellet vindpark er beregnet til å gi elektrisk kraft til nærmere 9000 husstander. Parken er knyttet til det eksisterende kraftledningsnettet via en 500

m lang kraftledning fra vindkraftverket, og videre til en eksisterende kraftledning koblet til Straum transformatorstasjon. [12, 13]

2.3 Kraftmarkedet i Norge

Norge er i dag tett integrert i et felles kraftmarked sammen med de andre nordiske landene. Den fysiske børsen for fysisk krafthandel for de nordiske og baltiske landene heter i dag NordPool, og den ligger plassert på Lysaker i Oslo. NordPool ble i 1996 verdens første internasjonale børs for omsetning av elektrisk energi, da Sverige, Danmark og Finland på dette tidspunktet ble integrert i kraftnettet og børsmarkedet. Det nordiske kraftmarkedet er videre integrert i det europeiske markedet. Det eksisterer overføringsforbindelser til Nederland, Tyskland, Baltikum, Polen og Russland. Etter planen skal en ny utenlandsforbindelse mellom Norge, Tyskland og Storbritannia settes i drift i løpet 2020/2021. [14]

Elektrisiteten som går gjennom kraftnettet følger minste motstands vei, og det er derfor ikke mulig for en sluttbruker å definere hvilken kraftprodusent som har produsert kraften, eller hvor langt kraften har blitt fraktet. Kraftmarkedet deles derfor inn i to deler, engrosmarkedet og sluttbrukermarkedet. I engrosmarkedet handles det med store kraftvolum, mellom aktører som kraftprodusenter, kraftleverandører, meglere eller større industrikunder. I sluttbrukermarkedet inngår den enkelte strømforbruker en avtale om kjøp av kraft. Sluttbrukeren står fritt til å velge kraftleverandør. Husstander, industri og andre mellomstore brukere som for eksempel hoteller inngår i sluttbrukermarkedet. Nettselskapene holder kontinuerlig oversikt over hvor mye kraft produsentene leverer til kraftnettet, og hvor mye den enkelte sluttbruker tar ut. Figur 2.3 viser en enkel illustrasjon av hvordan det norske kraftmarkedet henger sammen, fra kraftprodusent og til sluttbruker. [14]



Figur 2.3: Enkel skisse av hvordan kraftmarkedet i Norge henger sammen. [14]

Kraftprodusent

Hele prosessen med kraftforsyning til sluttbrukere, starter hos kraftprodusentene. All kraft som benyttes blir produsert av større eller mindre kraftprodusenter, og det varierer om produsert kraft er fornybar eller ikke. Det er kraftprodusentene som eier kraftverkene som produserer elektrisk energi, som for eksempel en vindpark eller et vannkraftverk. De fleste kraftprodusenter i Norge er offentlig eide, hvor Statskraft står for nesten halvparten av den samlede produksjonen. Enkelte større selskaper eier egne kraftverk og opererer som private kraftprodusenter, først og fremst for å stå for kraftproduksjonen til egen industrivirksomhet. Norsk Hydro er et eksempel på en slik kraftprodusent. [15, 16]

Basert på produksjonshistorikk og samlet installert effekt i kraftverket, beregner kraftprodusenten hvor mye de antakeligvis kommer til å produsere kommende dag. Dette meldes til NordPool,

sammen med et gitt prisnivå, som gjenspeiler hvor mye produsentene mener produksjonen er verdt. Produsert kraft blir prisgitt hos NordPool, og selges til ulike kratleverandører. [14, 16]

NordPool

NordPool er i dag børsen for fysisk krafthandel i de nordiske og baltiske landene, og det er NVE som har autorisert dette i Norge. Om lag 90% av all kraft i Norden handles gjennom NordPool. Kraftprodusentene melder fra til NordPool hvor mye de ønsker å selge det kommende døgnet og til hvilken pris, mens strømleverandørene på vegne av sluttbrukerne melder fra om hvor mye de ønsker å handle og hva de er villige til å betale pr. MWh. Basert på kjøpere og selgeres innmeldte bud, beregnes prisen for hver time de kommende 24 timene av en algoritme. Kalkuleringen finner sted hver dag klokken 12:00, og de kalkulererte prisene gjøres offentlige klokken 12:42 samme dag. Algoritmen tar også med i beregningen hvor mye kraft som overføres mellom de fem elspot-områdene i Norge, samt frem og tilbake mellom landegrensene. Spotprisen som settes oppgis i €/MWh, og norske strømleverandører konverterer denne prisen til øre/kWh for sine kunder. I 2020 var gjennomsnittlig Euro-kurs lik 10.7258 NOK [17]. NordPool håndterer kommende dag oppjøret fra krafthandlene, og strømleverandørene må betale det de skylder kraftprodusentene. [14, 18]

Strømnett og netteier

For at den produserte elektriske kraften skal kunne fraktes fra kraftverket og til sluttbrukeren, er det nødvendig med et godt utbygd strømnett. Selskapene som bygger, drifter og vedlikeholder kraftnettet kalles nettselskaper. Nettselskapene har naturlig monopol i sine geografiske områder, da det ikke vil være samfunnsøkonomisk å åpne for et konkurrerende marked hvor flere aktører bygger ut strømnett i samme områder. NVE gir områdekonsesjon til nettselskapene, hvor de er pliktige til å forsyne alle innbyggere innenfor konsesjonsområdet. De geografiske områdene deles naturlig inn etter for eksempel fylker eller kommuner. Alle strømforbrukere i Norge betaler nettleie til sitt nettselskap. Nettleien beregnes ut ifra en satt pris pr. kWh elektrisitet brukt. Nettleien dekker blant annet drift, vedlikehold og modernisering av kraftnettet. [16, 19]

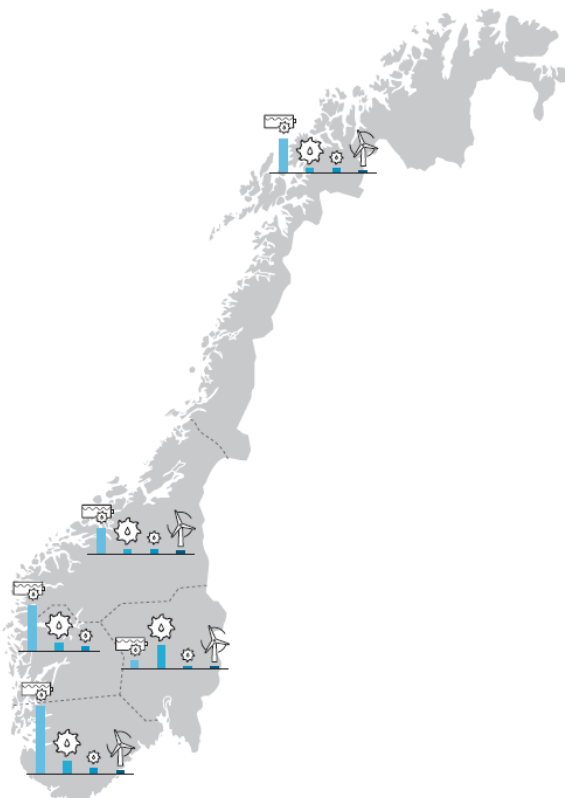
Kraftleverandør

Strømleverandørene i Norge virker som bindeleddet mellom kraftprodusent og sluttbruker. Kraftleverandørene melder ifra til NordPool hvor mye kraft de har behov for, og kraften handles i engrosmarkedet. Videre selges kraften på sluttbrukermarkedet til husholdninger, næringsbygg, industri og andre kraftforbrukere som ikke produserer egen kraft eller selv handler strømmen sin direkte fra engrosmarkedet. [14, 16]

Kapasitet på kraftnettet

Kraftnettet i Norge og Norden er satt opp som et sammenhengende strømnettverk, slik at krafthandelen flyter uavhengig av hvor kraften produseres og leveres. Faktorer som vær, antall sluttbrukere og kraftproduksjon, medfører at forskjellige områder i Norge har ulike kraftbehov til ulike tidspunkt. Norge er derfor delt inn i fem elspotområder, vist i figur 2.4. Dette gir ulike regionale kraftsituasjoner, som varierer enten på timebasis eller sesongbasis. Enkelte regioner kan ha et kraftoverskudd, samtidig som at andre regioner har et underskudd på kraft. Dette skaper et behov for import og eksport av kraft mellom elspotområdene. Når det eksporteres kraft fra regioner med overskudd til regioner med underskudd, er kapasiteten på kraftnettet

en avgjørende faktor. Er det ikke tilstrekkelig kapasitet på nettet til å eksportere og importere kraftmengden det er behov for, vil det oppstå en flaskehals i dette området. [14]



Figur 2.4: Fremstilling av hvordan Norge er delt inn i fem elspotområder. Bildet er hentet fra Energifakta Norge [14], og modifisert.

Reservemarkedet/Frekvensmarkedet

Ulike faktorer som hvilken kraft som produseres på et tidspunkt eller over en periode, og import og eksport, vil kunne føre til ubalanse i kraftsystemet. Statnett benytter et reservemarked for å regulere forbruk og produksjon, avhengig av ubalansen. Kraftsystemet er i balanse ved en frekvens på 50Hz. I Norden deles reservemarkedet inn i primærreserver, sekundærreserver og tertiærreserver, hvor primær- og sekundærreservene aktiveres automatisk etter behov ved endring av frekvens, mens tertiærreservene må aktiveres manuelt av systemoperatørene. [14, 20]

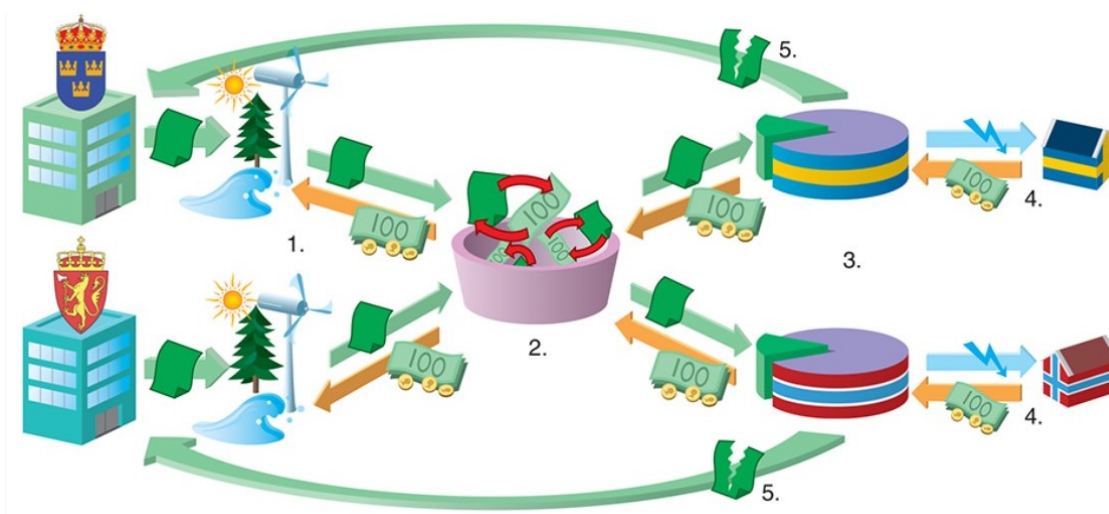
En ubalanse i kraftsystemet fører til at den roterende massen i kraftsystemet omgjøres til elektrisk energi og frekvensen endrer seg, slik at primærreservene aktiveres. Disse reservene handles i et eget døgn- og ukesmarked, henholdsvis D-1 og D-2. D-1 aktiveres etter elspotmarkedet for å dekke restbehov, og D-2 aktiveres før elspotmarkedet hvor det er mest hensiktsmessig. [14, 21]

Ved vedvarende ubalanse på inntill to minutter, vil sekundærreservene aktiveres. Disse reservene bringer frekvensen i kraftsystemet tilbake til 50 Hz, og frigir med det primærreservene slik at de er tilgjengelige til å håndtere nye ubalanser. Sekundærreservene handles på et eget marked, og det har de siste årene vært prioritert å handle i timene hvor det er vanskeligst å holde balansen. Dette inntreffer morgen, kveld og ved døgnskifte. [14, 22]

Om det fremdeles finnes behov for frekvensregulering etter 15 minutter, eller ved håndtering av regionale flaskehalsar på kraftnettet, aktiveres tertiærreservene. Alle lands delsystemer har dimensjonerende feil, og landene har gjennom Nordisk Systemdriftsavtale krav på tertiærreserver lik størrelsen på den dimensjonerende feilen. I Norge utgjør dette behovet totalt 1200 MW, og Statnett har i tillegg sikret ytterligere 500 MW for håndtering av ubalanser og flaskehalsar. [23]

El-sertifikater

El-sertifikater er en markedsbasert støtteordning pålagt av myndighetene i Norge og Sverige for at det skal lønne seg for kraftprodusenter å investere i prosjekter hvor det bygges ut anlegg for fornybar energiproduksjon. Figur 2.5 illustrerer hvordan el-sertifikatmarkedet er bygget opp, og hvordan det henger sammen fra statlig instans og til sluttbruker. [24]



Figur 2.5: Illustrasjon av hvordan el-sertifikatmarkedet fungerer. [24]

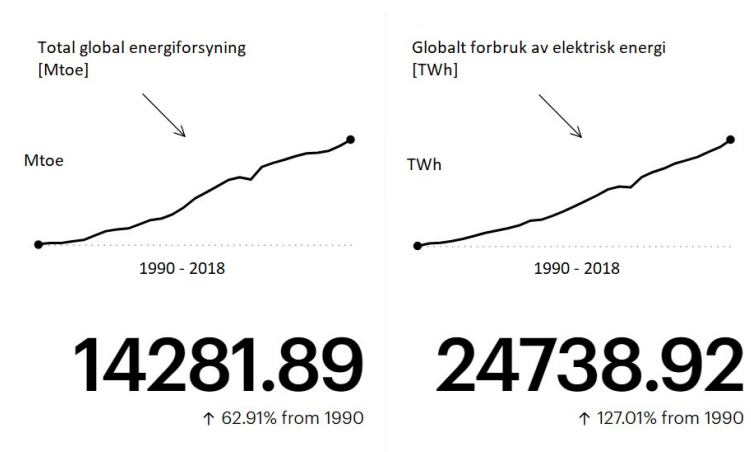
I figur 2.5, punkt 1, illustreres det at kraftprodusenter som produserer fornybar kraft, får tildelt ett el-sertifikat per MW elektrisk kraft produsert, i opptil 15 år. Alle kraftleverandører er pålagt av myndighetene å handle el-sertifikater på en viss kvote av beregnet elektrisitetsforbruk. Dette fører til en etterspørsel etter el-sertifikater, som medfører en etterspørselsbestemt markedsverdi på el-sertifikatene. Kraftprodusenten får en ekstra inntekt gjennom el-sertifikatene i tillegg til inntekt gjennom solgt kraft. Sluttbrukeren av den elektriske kraften betaler kraftleverandøren for el-sertifikater i form av et påslag pr. kWh brukt elektrisk energi, og er med dette med på å finansiere utbyggingen av fornybar kraftproduksjon. Dette illustreres i figur 2.5, punkt 2 til 4. Punkt 5 i figur 2.5 illustrerer at kraftleverandører hvert år må annullere en andel el-sertifikater for å oppfylle el-sertifikatplikten. [24]

Kraftpris

Den gjeldende kraftprisen vil basere seg på flere av faktorene nevnt i kapittel 2.3. NordPool setter en timesbasert spotpris for de fem elspotområdene i Norge. Prisen settes på grunnlag av tilbud og etterspørsel av kraft. Mengde fornybar energi i forhold til fossil energi, kapasitet på kraftnettet og flaskehalsar i og mellom de geografiske regionene er påvirkende faktorer. I tillegg legges myndighetspålagte el-sertifikatene til spotprisen. [14, 16, 24]

2.4 Energibehov

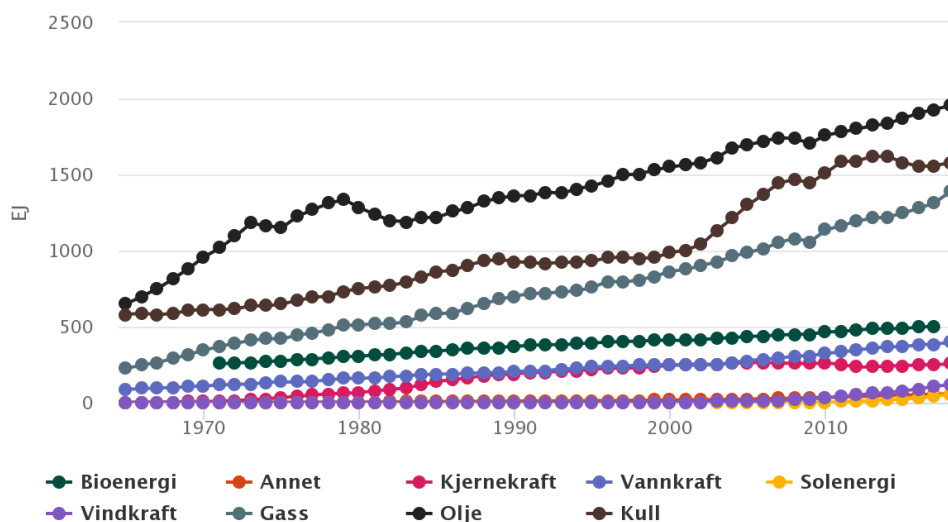
På verdensbasis er energibehovet i dag på sitt høyeste noen sinne. Behovet utvikler seg i takt med dagens befolkningsvekst, i tillegg til at elektrifisering av all industri og næringsliv fører til en enorm vekst i dagens og fremtidens energibehov. [25] Det Internasjonale Energibyrådet, IEA, ble i 1974 grunnlagt med hensikten om å sikre en stabil oljeforsyning. IEA har siden 1974 utviklet seg til å i dag være sentrum i den globale energidebatten, hvor stabil energiforsyning fremdeles står i hovedfokus. I dag består IEA av 30 medlemsland spredt over hele verden, som for eksempel Canada, Tyskland og Norge. IEA har gjennomført store studier på blant annet global energiforsyning opp mot det globale forbruket av elektrisk energi, vist i figur 2.6. [26, 27]



Figur 2.6: Global energiforsyning og globalt forbruk av elektrisk energi fra 1990 til 2018. Bildet er hentet fra IEA's hjemmesider [27], og modifisert.

Grafen til venstre i figur 2.6 viser hvordan den globale energiforsyningen har utviklet seg fra 1990 til 2018, vist i Mtoe, som står for millioner tonn oljeekvivalenter. 14281.89 Mtoe er verdien den totale, globale energiforsyningen lå på i 2018, og figuren viser at dette tilsvarer en økning på 62.91% siden 1990. Grafen til høyre i figur 2.6 viser globalt forbruk av elektrisk energi fra 1990 til 2018, vist i TWh. 24738.92 TWh er verdien det globale elektrisitetsforbruket lå på i 2018, og figuren viser at dette tilsvarer en økning på 127.01% siden 1990. Studien, fremstilt i figur 2.6, forteller med andre ord at den globale kraftforsyningen har økt betraktelig siden 1990, men at det globale elektrisitetsforbruket har økt enda mye mere i samme tidsrom. [27]

Som ett tiltak til det stadig økende energibehovet, bygges det i store deler av verden ut nye kraftverk. Det rettes mer og mer fokus mot fornybare energikilder til bruk i kraftproduksjonen, da dette er nødvendig for å unngå global oppvarming. Figur 2.7 viser utviklingen i det globale energiforbruket fra 1965 til 2015, fordelt på energityper. Fra figuren kommer det frem at verden fremdeles er veldig avhengig av fossile energikilder. Overgangen fra fossile energikilder til utelukkende ren energi skjer steg for steg, og det finnes en rekke løsninger som er med på å drive dette fremover. Utbygging av fornybar kraftproduksjon vil være grunnpilaren for å få dette til, sammen med for eksempel energilagring og en mulig kombinasjon av dette. [28]



Figur 2.7: Globalt energiforbruk, primærenergi målt i exajoule [EJ]. [28]

2.5 Batteriteknologi

Batterier er noe som har vært tilgjengelig helt fra Benjamin Franklin satte sammen det første batteriet for 250 år siden. 50 år senere utviklet Alessandro Volta, som omtales som batteriets far, et batteri basert på elektrokjemiske egenskaper. Batteriutviklingen er i konstant utvikling, noe som bidrar til både sikrere strømforsyning og større muligheter off-grid.

Et batteri er en komponent som omdanner kjemisk energi direkte over til elektrisk energi. Batterier deles inn i to ulike typer, primærbatterier og sekundærbatterier. Primærbatteriene kjenne- tegnes med at disse omdanner kjemisk energi til elektrisk energi ved en ikke-reversibel prosess, altså at de kun kan brukes én gang. Sekundærbatteriene har en reversibel energiomforming fra kjemisk til elektrisk energi. Det vil si at batteriet kan lades opp et viss antall ganger etter hver utlading. Det er disse batteriene som er under en kraftig utvikling, og som vil være fremtidens batterier. Her omdannes den kjemiske energien i batteriet direkte til elektrisk energi via en elektrokjemisk reduksjon-oksidasjon, også kalt redoksreaksjon. Den negative polen av batteriet omtales som anoden, og her vil det forekomme en oksidasjon. På den positive polen, også kalt katoden, skjer en reduksjon. Et typisk oppladbart batteri har reaktanter og produkter lagret inne i selve batteriet. Ved opplading av batteriet vil reaksjonen reverseres ved hjelp av elektrolyse. For et vanadium redoks flytbatteri vil reaktantene være lagret utenfor selve batteriet i tanker, slik som vist i figur 2.9. [29]

2.5.1 Energilagringssystemer

Miljøkrisen verden står ovenfor er et kjent problem i dagens samfunn. Noe av denne krisen er knyttet til behovet for å skaffe nok energi til å drive samfunnet. De siste ti årene har hovedandelen av energiproduksjon kommet fra fossile energikilder som skaper store klimagassutslipp, slik som CO₂-utslipp. Kraftproduksjon fra fornybare energikilder (RES) har økt betydelig de siste årene, slik som vindenergi og solenergi. Disse energikildene har sine svakheter ved at de er avhengig av værforholdene. Er det null vind vil ikke vindturbinene produsere energi. Dette medfører en del vanskeligheter, med mindre energien kan lagres når det er gunstige produksjonsforhold og sendes ut på nettet ved dårlige forhold. Dette tilsier at behovet for energilagringssystemer (ESS)

er stort ved produksjon med fornybare energikilder. Videre kan et energilagringssystem bidra til en flatere lastkurve og som et støttesystem ved vedlikehold eller feil. Energi-lagringssystemer kan hovedsaklig deles inn i 3 systemer, henholdsvis mekaniske, elektriske eller elektrokjemiske systemer. Spesielt aktuelt i vindparker er de elektrokjemiske systemene, da disse har en høy kapasitet. [30]

Innad i mekaniske energilagringssystemer er det to systemer som skiller seg ut, henholdsvis vannkraftlagring (PHES) og trykkluft-energilagring (CAES). Hovedfordelen med disse to systemene er at de har høy energikapasitet, og i tillegg til dette har vannkraft-lagringssystemet også en virkningsgrad på omlag 80%. Bruken av trykkluft-energilagring er svært utbredt, og har en total lagringskapasitet på 184 GW over hele verden. Begge disse systemene krever god plass og trykkluft-energilagringssystemet har en forholdsvis lav virkningsgrad på under 70%. [30]

Det elektriske energilagringssystemet (SMES) som er mest utbredt, er basert på elektromagnetisk energi og en elektrisk dobbeltlagskondensator (EDLC) som vil bruke den elektriske energien direkte. Fordelene med dette systemet er at energieffektiviteten er på omtrent 90%. I tillegg til dette kan systemet levere store mengder elektrisitet og det har en lang livssyklus. Ulempene med dette systemet er at det er svært kostbart og har en høy selvutlading. Det vil si at systemet bare kan lagre energien i korte perioder før selvutladingen skaper problemer. [30]

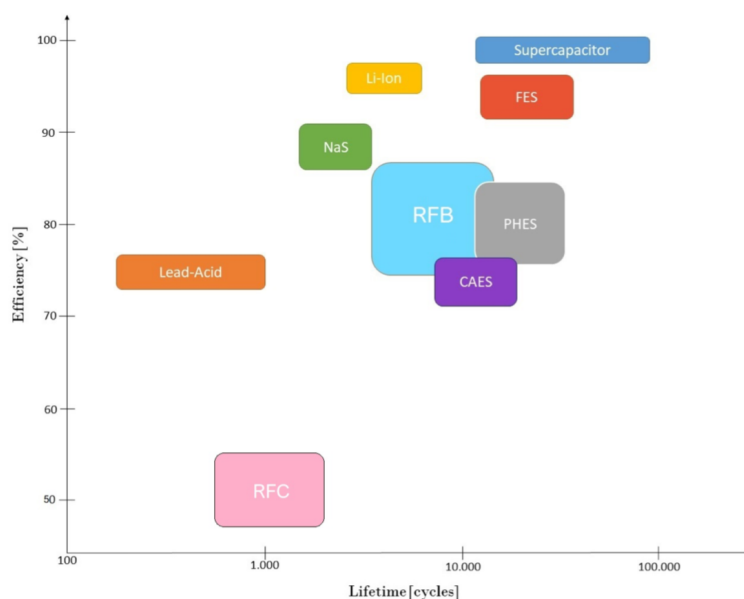
Det systemet som har størst potensiale med tanke på energilagring on-site i vindparker er de elektrokjemiske systemene. Tidligere har type batterier som blysyre-batteriet, natriumsvovel-batteriet og litiumion-batteriet blitt mye anvendt. Disse teknologiene har en gjennomgående høy virkningsgrad, men problemer med høye driftstemperaturer og giftige kjemikalier har skapt en rekke større utfordringer. Derfor har mye forskning blitt gjort på området, og spesielt brenselceller og redoks-batterier har blitt fremmet som systemer med gode fremtidsutsikter. Brenselceller omdanner kjemisk energi fra hydrogen til elektrisk energi ved at det oppstår en elektrokjemisk reaksjon mellom stoffene, da typisk oksygen. Ved å integrere en elektrolysator vil energien kunne lagres. Dette vil da bli en regenerativ brenselcelle (RFC). Fordelene med denne formen for energilagring er at det ved bruk av hydrogen, kun vil danne vanndamp og dermed være miljøvennlig. Effektiviteten vil i slike systemer ligge mellom 40% og 60%. Tabell 2.1 viser de ulike energilagringssystemene og deres egenskaper. [30]

Tabell 2.1: Fordeler, ulemper, kapasitet og utladingstid for ulike energilagringssystemer. [30]

ESS	Hovedfordelen	Hovedulempen	Kapasitet	Utladingtid
PHES	Høy energikapasitet	Plasskrevende	10MW - 1GW	10 – 100h
CAES	Høy energikapasitet	Plasskrevende	10MW - 1GW	1 – 50h
EDLC	Høy energitetthet	Kostbart	10kW - 1MW	1 – 10s
Blysyre	Billig	Kort livsløp	1kW - 10MW	0.01 – 1s
Natrium-svovel	Høy energi	Utrygt	100kW - 10MW	10h
Litium-ion	Høy energi	Utrygt	1kW - 1MW	0.1 – 10h
RFC	Høy energitetthet	Lav energiintensitet	100kW - 10MW	1 – 10h
RFB	Fleksibel	lav energitetthet	100kW - 90 MW	1 – 10h

Redoks flytbatterier (RFB) er en av de nyeste og mest lovende batteriteknologiene på markedet. Denne teknologien er fordelaktig ovenfor andre batteriteknologier med bakgrunn i driftsikkerheten, det fleksible designet, den lange levetiden og at selvutladingen er tilnærmet null. Redoks

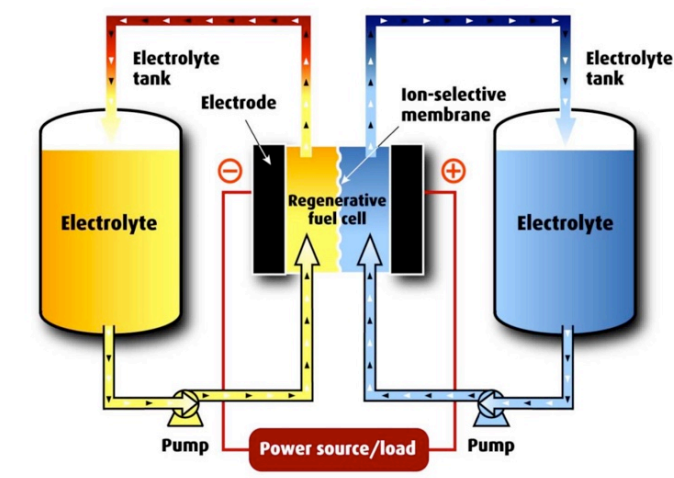
flytbatteriet tillater at store mengder energi blir levert over lange perioder, med lavt vedlikehold av batteriet. Figur 2.8 viser en sammenligning mellom de ulike energi-lagringssystemene på markedet i dag. Her vises det også at redoks flytbatterier kommer godt ut på både effektivitet og levetid. [30]



Figur 2.8: Sammenligning mellom effektivitet og levetid for ulike energilagringssystemer. [30]

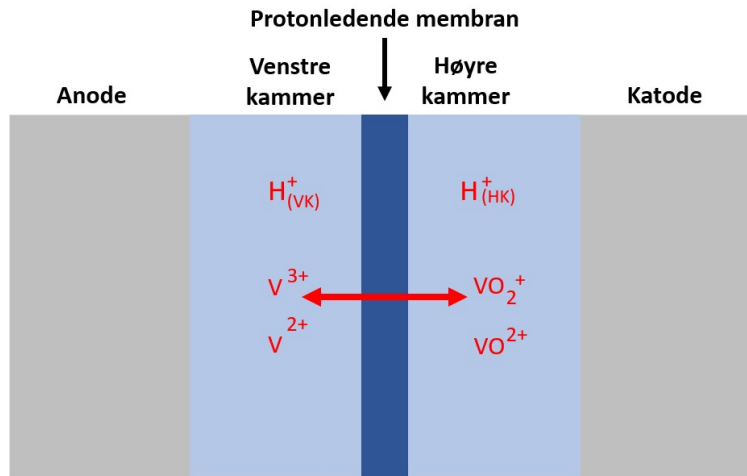
2.5.2 Vanadium redoks flytbatteri

Et vanadium redoks flyttbatteri er en av de nyeste og mest lovende batteriteknologiene på markedet. Batteriet sees på som en elektrokjemisk celle som omdanner kjemisk energi til elektrisk energi, og motsatt da reaksjonen er reversibel. Den kjemiske oppløsningen i hver av de to elektrolyttankene sirkuleres gjennom systemet på hver sin side av en membran, slik som vist i figur 2.9. [29]



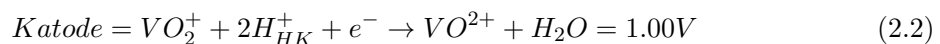
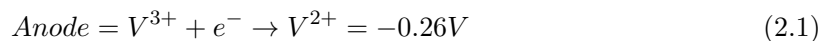
Figur 2.9: Oppbygningen av et vanadium redoks flytbatteri. [21]

I den regenerative cellen vil energien fra to vanadium redokspar lagres. I den negative delen av batteriet, er ionene V^{3+} og V^{2+} tilstede, mens i den positive delen er ionene VO_2^+ og VO^{2+} tilstede. Et vanadium redoks flytbatteri er bygd opp av to halvceller som blir separert av en protonledende membran. Denne membranen skiller anodene i den ene tanken fra katodene i den andre. Hver halvcelle inneholder en elektrode, hvor oksidasjonen eller reduksjonen forekommer. Protonet H^+ er det eneste som slipper gjennom membranen, slik som vist i figur 2.10. Sammensetningen av H^+ protoner er forskjellig på hver sin side av membranen, vist med H_{VK}^+ for venstre kammer og H_{HK}^+ for høyre kammer. Polymer er ofte benyttet som membran på bakgrunn av dens porøse oppbygning. [29, 31]

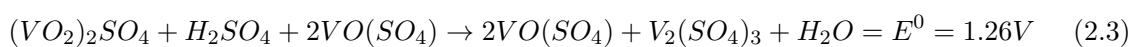


Figur 2.10: Illustrasjon av den regenerative brenselcellen. [29]

Et nøkkelelement i bruken av vanadium redoks flytbatterier er at vanadium har et svært fleksibelt oksidasjonstall. Reaksjonene som oppstår ved utlading av batteriet er vist i ligning 2.1 for anoden, og ligning 2.2 for katoden.



Elektrolytten som vanligvis brukes i tankene er svovelsyre (H_2SO_4). Svovelsyre brukes for å optimalisere protonstrømmen av H^+ ioner gjennom membranen, og for å balansere reaksjonen i batteriet. Det er viktig at membranen ikke slipper gjennom uønskede protoner, noe som er et kjent problem ved flytbatterier. Bruken av vanadium reduserer dette betraktelig ved at det allerede er vanadium i de fleste rommene. Totalreaksjonen og standard cellepotensial til vanadium redoks flytbatteriet er vist i ligning 2.3. [29, 31]



For å finne standard cellepotensial E° , brukes det cellepotensialet som kommer fra både anode-reaksjonen og katodereaksjonen, slik som vist i ligning 2.4. Anoden vil her være et mål på evnen til å gi fra seg elektroner, mens katoden er et mål på evnen til å motta elektroner. [30]

$$E^\circ = E_{katode}^\circ - E_{anode}^\circ \quad (2.4)$$

Standard cellepotensial gir kun et uttrykk for den kjemiske reaksjonen som oppstår inne i selve cellen. Elektrodepotensialet inne i batteriet er avhengig av hvordan konsentrasjonene av vanadium (Ci) er. Ligning 2.5 viser hvordan dette er utledet. [30]

$$E = E^\circ + \frac{RT}{F} \ln \left[\left(\frac{c_{VO_2^+} c_{H^+}^2}{c_{VO^{2+}}} \right)_{katode} \cdot \left(\frac{c_{V^{2+}}}{c_{V^{3+}}} \right)_{anode} \right] \quad (2.5)$$

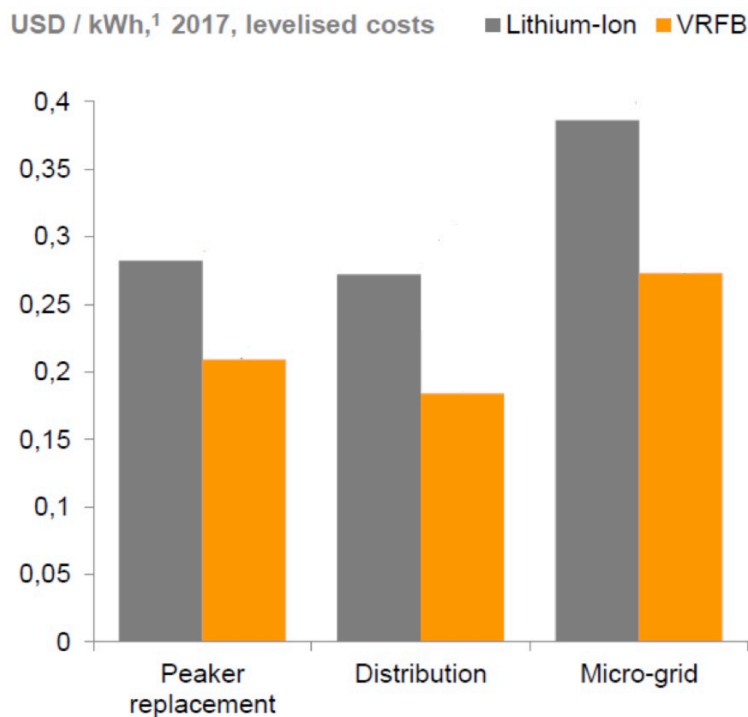
R, F og er konstanter, henholdsvis gass ($8.314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$) og faradays ($96.485 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$), mens T er temperaturen til cellen. Ligning 2.5 gjør det mulig å finne den teoretiske verdien til cellepotensialet. Denne verdien vil ikke være spesielt høy, noe som gjør denne type batterier gunstige til å arbeide med store energimengder. [30]

Fordelene med et vanadium redoks flytbatteri er at elektrolyttankene er lagret utenfor den kraftgenererende enheten. Dette medfører at størrelsen på tankene kan justeres, og dermed kan kapasiteten til batteriet være veldig høy. Batterieffekten styres av cellene i batteriet, hvor høyere antall celler gir en høyere effekt på batteriet. Et vanadium redoks flytbatteri er et utmerket valg når det trengs lagring on-site, og responstiden til batteriet er svært lav. Dette medfører at vedlikehold og utskifte av elektrolytt kan gjennomføres uten store vedlikeholdstider på batteriet. Med bakgrunn i at elektrolyttene lagres separat utenfor selve batteriet, kan selvutladingen neglisjeres og systemet egner seg dermed også som et back-up system. Et vanadium redoks flytbatteri er et miljøvennlig alternativ til energilagring, og det har en lav støyutvikling. Levetiden til et vanadium redoks flytbatteri er på over 20 år og virkningsgraden er anslått til å ligge på mellom 80 – 90 %. Et vanadium redoks flytbatteri har en begrensning på 12000 – 14000 sykluser i løpet av sin levetid. [29, 31, 32]

Et vanadium redoks flytbatteri har en energitetthet på rundt $25 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$. Dette er relativt lavt i forhold til andre energilagringssystemer, slik som hydrogenbaserte brenselceller. Lav energitetthet medfører at batteriet er svært plassavhengig, altså at tankene med elektrolytt må være veldig store. Temperaturen i tankene bør ligge mellom 15°C og 35°C . Det vil si at det i Norge trengs en form for temperaturkontroll og oppvarming/nedkjøling av tankene. Et vanadium redoks flytbatteri fungerer optimalt ved en utetemperatur mellom -15°C og 45°C . [29, 31]

En aktør i Kina har startet en storstilt operasjon med å bygge et vanadium redoks flytbatteri i størrelsesordenen på 800 MWh. Når dette batteriet kommer i drift vil det være det største vanadium redoks flytbatteriet kapasitetsmessig som er satt ut i produksjon. Denne mengden lagringskapasitet er revolusjonerende i dagens marked, og oppføringen av dette batteriet finner sted ved den største kjemiske energilagringsstasjonen i verden, Dalian High-Tech Zone. [33]

Vanadium redoks flytbatterier har en solid nedgang i kostnader. Kostnaden for utvinning av vanadium har sunket betydelig de siste årene, sammen med billigere materialkostnader. Figur 2.11 viser prisen i USD per kWh lagret i et vanadium redoks batteri. Ved å se på kostnaden under "Distribution", ser en at et vanadium redoks flytbatteri er billigere enn det noe mere utbredte litium-ion batteriet. Kostnadene er utledet som LCOE-kostnader. [34, 35]



Figur 2.11: Kostnaden per kWh lagret i et vanadium redoks flytbatteri, gitt i USD i 2017. [34]

LCOE (Levelized cost of energy) er et mål på kostnaden til en energiproduserende enhet. For å beregne LCOE må nåverdien av de totale kostnadene ved å bygge og drifte produksjonsenheter, deles på den totale produksjonsmengden i løpet av dens levetid. De totale kostnadene kan kategoriseres som investeringskostnader, utgifter knyttet til drift og vedlikehold og eventuelle drivstoffskostnader. Ligning 2.6 viser hvordan LCOE kan utledes. [36, 37]

$$LCOE = \frac{\text{Totale kostnader i løpet av levetiden}}{\text{Produksjon i løpet av levetiden}} \quad (2.6)$$

3 Metoder

Denne delen av rapporten tar for seg prosessen og utførelsen av beregningene i Excel og MATLAB som senere presenteres i resultater. Excel blir brukt til å gjøre en økonomisk analyse på lønnsomheten ved bruk av et vanadium redoks flytbatteri i den aktuelle vindparken. MATLAB er et programmeringsprogram som blir brukt for å analysere store mengder data, fra både produksjonen til Bessakerfjellet vindpark og fra spotprisene i det aktuelle elspotområdet. Flere algoritmer blir i tillegg produsert i MATLAB, med bakgrunn i den tilsendte dataen.

Rapporten tar for seg tre ulike scenarier. Antakelsene i scenario 1 og scenario 2 kombineres i scenario 3 med hensikt om å optimalisere resultatet. Mengder data er innsisert og analysert opp mot hverandre, og alle grafer og tabeller er hentet ut fra MATLAB.

3.1 Produksjon fra Bessakerfjellet vindpark

Produksjonsdata fra hver time i hele 2020 ble tilsendt fra Trønderenergi. For å analysere denne dataen importeres produksjonsdataen fra en .csv-fil over til Excel. For å danne et oversiktsbilde over total produksjon, produsert av hele vindparken i løpet av 2020, antas det at vindparken skal sees på som en produserende enhet. Dataene fra alle 25 turbinene legges sammen, slik at totalproduksjonen for 2020 kan hentes ut, i tillegg til vindparkens totalproduksjon hver time det gjeldende året. For å kunne lese all data ble Excel-filen med produksjonsdata overført til MATLAB. Excel-filen ble lagret som en .txt-fil, for videre å importeres i MATLAB.

I MATLAB analyseres dataen og plottes, slik at produksjonen av alle turbinene de første 24 timene i 2020 kan presenteres. Første del av algoritmen er utledet slik at en graf av produksjonsdataen for alle turbinene plottes. Videre er grafen definert med merkelapper og begrensninger, henholdsvis "Timer" gitt i 0 – 24 på x-aksen og 0 – 2400 kWh på y-aksen. Algoritmen blir gjentatt 25 ganger for å få med alle turbinene i grafen, vist i vedlegg A.

I tillegg til produksjonsdata ble årlig vindhistorikk fra området tilsendt fra Trønderenergi. For å analysere denne dataen brukes både Excel og MATLAB til hver sin hensikt. Excel brukes til å finne den gjennomsnittlige vindstyrken for hver måned i 2020. Denne datafilen overføres til MATLAB hvor en algoritme utledes for å få frem et plot av vindstyrken hver måned, vist i vedlegg C.

3.2 Spotpris

Spotprisene for hver time i 2020 ble tilsendt som en Excel-fil fra Trønderenergi. Excel benyttes til å bearbeide dokumentet slik at ønskelig elspotområde fremheves, i tillegg til at gjennomsnittlig spotpris beregnes for hver måned. Informasjonen overføres til MATLAB hvor en algoritme utledes, vist i vedlegg D. Algoritmen danner to grafer som viser henholdsvis plottet av spotprisen for alle timene i 2020, samt plotet av gjennomsnittlig spotpris for hver måned i 2020. Dataen og plotene over spotpris benyttes til sammenligning og diskusjon rundt resultatene tilhørende scenario 1 til scenario 3.

3.3 Generelle antakelser

For å muliggjøre simuleringene basert på tilsendt data, er det gjort noen generelle antakelser i arbeidet med oppgaven. I første omgang er det gjort antakelser om batteriet. Det antas at batteriet har en egen algoritme som selv vet hvilke tidspunkter batteriet skal lades opp eller

lades ut, slik at det unngås å måtte ta manuell styring og kontroll i betrakning. Videre antas det at batteriet som installeres i vindparken har stor nok kapasitet til å dekke behovet beregningsmodellene kommer frem til. I etterkant tas en beslutning på om dette vil la seg gjøre i praksis, samt eventuelle kostnader rundt et slikt batteri. Alle antakelser rundt batteriet er gjort etter samtaler med Trønderenergi og Bryte AS.

Det er blitt gjort en antakelse i samråd med Bryte AS på prisen rundt vanadium redoks flytbatterier. I dag finnes det ikke en felles standard rundt prising av denne typen batteriteknologi og litteraturen kommer ikke frem til en felles enighet. Figur 2.11, forklart i kapittel 2.5.2, viser en graf over kostnaden ved lagring i et vanadium redoks flytbatteri. Denne prisen benyttes videre i oppgaven.

Det er også blitt gjort antakelser rundt hvorvidt den tilsendte dataen er representativ for fremtidige vurderinger eller ikke. Gruppen har fått tilsendt produksjonsdata for Bessakerfjellet vindparks 25 turbiner, for hver time i 2020, sammen med gjeldende spotpris i tilsvarende tidsrom. Det er ikke mulig å forutsi eksakt fremtidig kraftproduksjon eller spotpris, og det antas at både produksjon og spotpris i fremtiden vil være lik som i 2020. På steder hvor Euro er gjort om til Norske Kroner er det tatt utgangspunkt i gjennomsnittlig kurs for 2020, beskrevet i kapittel 2.3. På tilsvarende måte antas det at den gjennomsnittlige valutakursen mellom Norske Kroner og USD i 2020 vil være gjeldende fremover, beskrevet i kapittel 2.5.2.

Det er blitt gjort antakelser rundt den tilsendte dataen, og om den er representativ for tidligere år, slik at det kan betraktes som en trend. Dette gjelder hovedsakelig for spotprisen og vindstyrken på Bessakerfjellet vindpark. Det antas at den tilsendte vinddataen for vindparken i 2020 er tilsvarende tidligere år, og at vindstyrken kan sees på som en trend. Samme forutsetning gjelder dataen for spotpris, hvor det antas at spotprisen i 2020 følger en trend.

3.4 Scenario 1 - Struping

Et hyppig problem i dagens vindkraftproduksjon er struping av overskuddskraft forårsaket av flaskehals i kraftnettet. Som et utbedringspotensial blir det sett på lagringsmuligheter ved hjelp av et vanadium redoks flytbatteri. For å simulere dette utarbeides en antakelse på at all produksjon over 30 MWh i døgnet skal lagres i batteriet. I samråd med Trønderenergi er det konkludert med at denne antakelsen vil skape en jevn og fin flyt i tilknytningspunktet.

MATLAB brukes for å lage en algoritme, vist i vedlegg E. Algoritmen har til hensikt å trekke ut produksjonsmengder over 30 MWh hver time, og er utledet slik at det genereres to kolonner i en tabell. Kolonnene inneholder henholdsvis opplading og utlading av batteriet. Når algoritmen går gjennom produksjonsmengden hver time, skapes et bilde av nødvendig kapasitet i batteriet.

For-løkken sjekker hvorvidt produksjonen er over eller under 30 MWh og plasserer disse verdiene i matrise A. Dette gjøres ved hjelp av to if-setninger innenfor for-løkken. Den første if-setningen genererer en kolonne med alle verdiene over 30 MWh ved å subtrahere 30 MWh fra den totale produksjonen. Disse verdiene gjengir hvor mye batteriet lades opp den gitte timen. Den andre if-setningen ser på alle verdiene under 30 MWh, og plasserer dem i en egen kolonne. Verdien settes til 0, for å illustrere at batteriet ikke lades opp.

Variabelen `ekstra_energi`, vist i vedlegg E, settes lik 0. Denne variabelen vil hele veien vise tilgjengelig kraftinnhold i batteriet. Videre er det dannet en ny for-løkke. Innenfor for-løkken

er det flere if-setninger, som har til hensikt å beregne verdiene som er nødvendig for å nå 30 MWh i tilknytningspunktet. Algoritmen undersøker verdien for alle timene i 2020 og variabelen `ekstra_energi` viser den konstante verdien i batteriet på det gitte tidspunktet.

3.5 Scenario 2 - Salg opp mot spotpris

Gruppen ønsker å se på muligheten for å utnytte forskjellen i spotprisen fra time til time, slik at produksjonen lagres i tidspunktene hvor salg av produsert kraft ikke gir en tilstrekkelig økonomisk gevinst. Det er ønskelig å selge den produserte kraften på tidspunkter med en mer gunstig spotpris. Fra Trønderenergi ble det tilsendt data over spotprisen, i elspotområdet Bessakerfjellet vindpark befinner seg i, for hver time i 2020. Filen ble mottatt som en .csv-fil, og importert til Excel for å finne gjennomsnittsprisen for 2020. Gjennomsnittlig spotpris i 2020 i elspotområdet i Midt-Norge var 9.46 €/MWh. For å unngå sesongbasert lagring, er det gjort en antakelse med en spotpris litt høyere enn gjennomsnittet. Det antas at det ikke er ønskelig å selge noe produksjon på tidspunkter hvor spotprisen er lavere enn 15 €/MWh, og at all produksjon i disse tidsrommene lagres i batteriet. Videre antas det at den lagrede produksjonen lades ut, sammen med den faktiske produksjonen, ved neste tidspunkt spotprisen er høyere enn 15 €/MWh. Vindparken selger produsert kraft som vanlig frem til spotprisen igjen synker under 15 €/MWh. I dette scenarioet antas det at kraftnettet ut fra vindparken ikke har en øvre begrensning, slik at den lagrede produksjonen kan sendes ut sammen med faktisk produksjon de gjeldende timene.

Slik som i scenario 1, blir MATLAB brukt til å utarbeide en algoritme, vist i vedlegg F. Dette gjøres for å undersøke hvilke tidspunkter produksjonen skal lagres, når vindparken skal operere som normalt og når den lagrede produksjonen skal selges på kraftnettet. Først opprettes en tom matrise B, der oppladet produksjon solgt på kraftnettet skrives inn. Neste del av algoritmen omhandler lagring av produksjon. En for-løkke bestående av to if-setninger undersøker spotprisen for alle timer i 2020, og om spotprisen på et gitt tidspunkt er over eller under 15 €/MWh. Er prisen under 15 €/MWh er det ønskelig å lagre produksjonen fremfor å selge den på kraftnettet, og all produksjonen denne timen lagres i første kolonne i matrise B. Er spotprisen over 15 €/MWh den gitte timen, er det ønskelig å selge produksjonen fremfor å lagre, og dette markeres med verdien 0 i første kolonne i matrise B.

Algoritmen i vedlegg F oppretter en tom matrise `spotplot` som viser batteriets verdi hver time, og variabelen `ekstra_energi2` settes lik 0. Denne variabelen viser hele veien tilgjengelig kraftinnhold i batteriet. En for-løkke tar for seg utlading av batteriet, samt tidspunktene hvor vindparken opererer som normalt. Løkken undersøker data for alle timene i 2020, for å avgjøre når batteriet skal utlades. Først defineres verdien til det oppladede batteriet lik sin egen verdi, addert med neste oppladning på et gitt tidspunkt. En if-setning definerer hva som skal skje dersom verdien i første kolonne i matrise B er lik 0, hvor vindparken skal selge produsert kraft fremfor å lagre. Om batteriet er utladet skrives verdien 0 inn i andre kolonne i matrise B. Kolonnen viser hvor mye som sendes ut på kraftnettet hver time. Er spotprisen høyere enn 15 €/MWh skal produsert kraft på det gitte tidspunktet selges på kraftnettet, sammen med eventuell tilgjengelig kraft i batteriet. Dette kommer frem i matrise B ved at produksjonsverdien på det gitte tidspunktet adderes med `ekstra_energi2`, og skrives inn i kolonne 2. Videre skrives batteriets kontinuerlige verdi inn i den tomme matrisen `spotplot`, og matrisen plottes. Til slutt skrives den matrise B inn i et tomt Excel-dokument.

Det er ønskelig å finne nødvendig kapasitet på batteriet i scenarioet. Matrisen `spotplot15`, bestående av den kontinuerlig oppdaterte verdien til batteriet åpnes i Excel. Funksjonen ”størst”

benyttes til å finne den største verdien i matrisen. Verdien tilsvarer den største mengden energi lagret i batteriet på et gitt tidspunkt. Denne verdien vil være den nødvendige kapasiteten til batteriet. I tillegg er det ønskelig å undersøke fortjenesten ved å lagre og selge produsert kraft ut ifra spotprisen. Det lages et Excel-ark som inneholder vindparkens ordinære produksjon uten batteri. Disse verdiene multipliseres med spotprisen i de tilsvarende timene. Kolonne 2 i matrise B viser all kraft som er solgt og til hvilke tidspunkter. Dataen importeres i samme Excel-ark, og multipliseres med tilsvarende spotpris. Fortjenesten på salg av kraft med ordinær produksjon subtraheres fra fortjenesten i scenarioet som inkluderer batteriet, slik at økonomisk gevinst ved en batteriinstallasjon utledes.

3.6 Scenario 3 - Optimering

I dette scenarioet er det ønskelig å undersøke om det er lønnsomt med en kombinasjon av scenario 1 og scenario 2. Det antas på lik linje som i scenario 1 at kraftnettet ut fra vindparken danner en flaskehals, og at produksjonen må strupes ved produksjon over 30 MWh. Videre er det ønskelig å undersøke om det er økonomisk gunstig å holde den lagrede energien i batteriet, fremfor å lade ut batteriet ved all produksjon under 30 MWh. Det er i stedet ønskelig å lade ut batteriet på tidspunkt hvor det både produseres mindre enn 30 MWh, og spotprisen er høyere enn en gitt verdi. Med grunnlag i at gjennomsnittlig spotpris i 2020 var 9.46 €/MWh, er det ikke ønskelig å selge noe av den lagrede overproduksjonen for spotpriser lavere enn dette. Det antas at på tidspunkter hvor det produseres mindre enn 30 MWh, vil produksjonen selges som vanlig ved en spotpris lavere enn 10 €/MWh. Gjenstående produksjon for å nå 30 MWh lades ut fra batteriet ved spotpriser over 10 €/MWh.

MATLAB benyttes til å utarbeide en algoritme, vist i vedlegg G, som kombinerer scenario 1 og scenario 2. En for-løkke sjekker totalproduksjonen for vindparken hver time i 2020. Løkken består av to if-setninger, som henholdsvis sjekker om produksjonen den gitte timen er større eller lavere enn 30 MWh. Er produksjonen større enn 30 MWh lagres overproduksjonen i første kolonne i en matrise C. Verdien representerer mengden kraft som lagres i batteriet på det gitte tidspunktet. Om produksjonen er lavere enn 30 MWh, lagres verdien 0 i samme kolonne for å illustrere at batteriet ikke lades opp.

Algoritmen, vist i vedlegg G, definerer en tom matrise D som viser mengden kraft lagret i batteriet hver time. Variabelen `ekstra_energi3`, viser den kontinuerlige verdien lagret i batteriet. Neste del av algoritmen omhandler utladingen av batteriet. Det opprettes en ny for-løkke som undersøker data for hver time i 2020. Først defineres `ekstra_energi3` slik at den hele tiden legger til verdien på foregående lagring. Videre sjekkes verdien i første kolonne i matrise C. Verdien 0 indikerer at vindparken ikke produserer 30 MWh, og det beregnes gjenstående mengde for å nå 30 MWh. Denne verdien er mulig å lade ut, og er vist ved variabelen `y`. Er batteriet fullstendig utladet, skrives verdien 0 i andre kolonne i matrise C. Andre kolonne i matrisen viser hvor mye som lades ut fra batteriet på et gitt tidspunkt. Viser verdien 0 indikerer det at produksjonen går som vanlig, og at batteriet ikke lader ut. Verdier større enn 0 representerer energimengden som lades ut fra batteriet.

To if-setninger undersøker om spotprisen på tilsvarende tidspunkt er høyere eller lavere enn 10 €/MWh. Er spotprisen lavere enn 10 €/MWh skal ikke noe av overproduksjonen lades ut, og verdien 0 skrives i andre kolonne i matrise C. Om spotprisen er høyere enn 10 €/MWh undersøkes tilgjengelig kraft i batteriet. Er det mindre tilgjengelig energimengde i batteriet enn gjenstående kraft for å nå 30 MWh, lades batteriet ut. Den utladede verdien skrives i andre kolonne i matrise

C, og `ekstra_energi3` settes lik 0. Er det mer tilgjengelig kraft i batteriet enn resterende behov for å nå 30 MWh, lades batteriet ut slik at en når 30 MWh i tilknytningspunktet. Den utladede energimengden subtraheres fra tilgjengelig kraft i batteriet. Til slutt defineres matrise D som den oppdaterte verdien til batteriet hver time i 2020.

Algoritmen vist i vedlegg G, oppretter et tomt Excel dokument hvor MATLAB skriver inn de oppdaterte verdiene fra matrise c. I Excel opprettes et dokument D10plot, bestående av alle årets timer i kolonne 1, og verdiene fra matrise D i kolonne 2. D10plot konverteres til en .txt-fil og importeres i MATLAB, hvor dataen plottes. Plotet visualiserer hvordan tilgjengelig kraft i batteriet varierer gjennom 2020.

For å finne den nødvendige kapasiteten i scenario 3 åpnes D10plot i Excel. Matrisen inneholder den kontinuerlig oppdaterte energimengden lagret i batteriet. Funksjonen "størst" benyttes til å finne den største verdien i kolonnen, tilsvarende den største kraftmengden som på ett tidspunkt er lagret i batteriet. For å finne den økonomiske gevinsten ved et installert batteri importeres kolonne 2 fra matrise C i Excel. Kolonnen inneholder data over hvor mye kraft som blir solgt i tillegg til ordinær produksjon på gitte tidspunkter. Dataen multipliseres med spotprisen på tilsvarende tidspunkter, og resultatene for hver time summeres for å finne inntjeningen på salg av lagret overproduksjon.

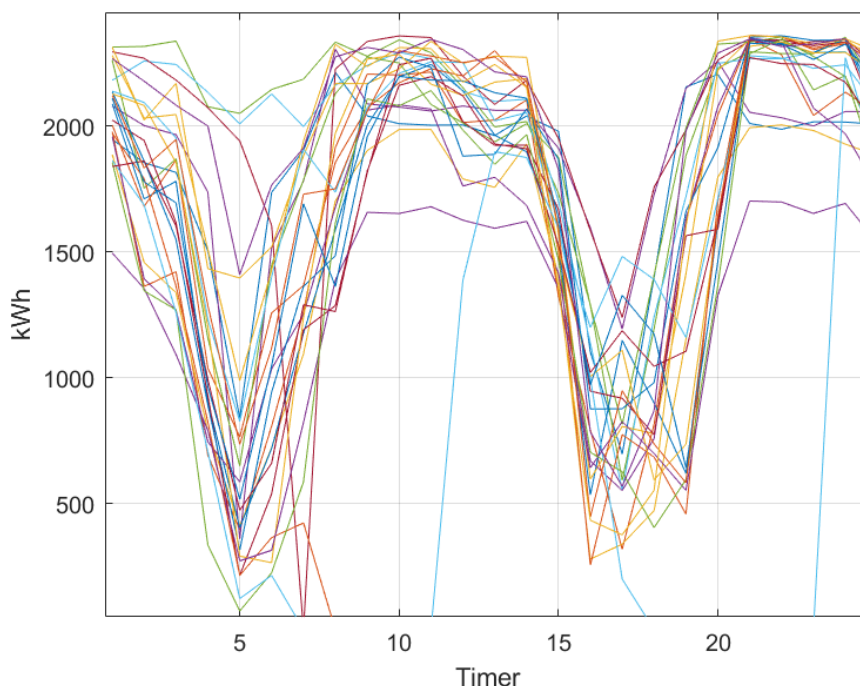
4 Resultat

Denne delen av rapporten vil ta for seg resultatene fra beregningene utført i MATLAB og Excel. Resultatene presenteres ved bruk av grafer, tabeller og tekst. Innholdet i resultatdelen vil danne grunnlaget for diskusjonen og videre konklusjonen.

For å underbygge oppgavens problemstilling om at et vanadium redoks flytbatteri kan være lønnsomt i vindparker, ble flere scenarioer vurdert. Scenario 1 er utledet for å skape en situasjon hvor den aktuelle vindparken må strupe overskuddskraft, og ser på muligheten for å løse dette ved lagring av kraften i batteriet. Videre vil flere scenarioer bli presentert for å optimalisere solgt produksjon og skape en økonomisk gevinst ved å selge kraft når spotprisen er høy, og lagre kraften når spotprisen er lav. Scenarioene blir presentert med ulike resultater videre i denne delen av oppgaven.

4.1 Produksjon fra Bessakerfjellet vindpark

For å få et overblikk over hvor mye produksjon som ble gjennomført i 2020 analyseres produksjonshistorikken fra den aktuelle vindparken, og undersøkes av en egenprodusert algoritme i MATLAB. Dette er vist i vedlegg B og forklart nærmere i kapittel 3.1. Vindparken inneholder 25 turbiner som alle produserer en gitt mengde i timen. Turbinene sees på som én produserende enhet, slik at totalproduksjon hver måned kan uthentes. Dette er forklart i kapittel 3.1 og kapittel 5.1. Grafen i figur 4.1 viser et plot av alle parkens 25 turbiner de første 24 timene i 2020.



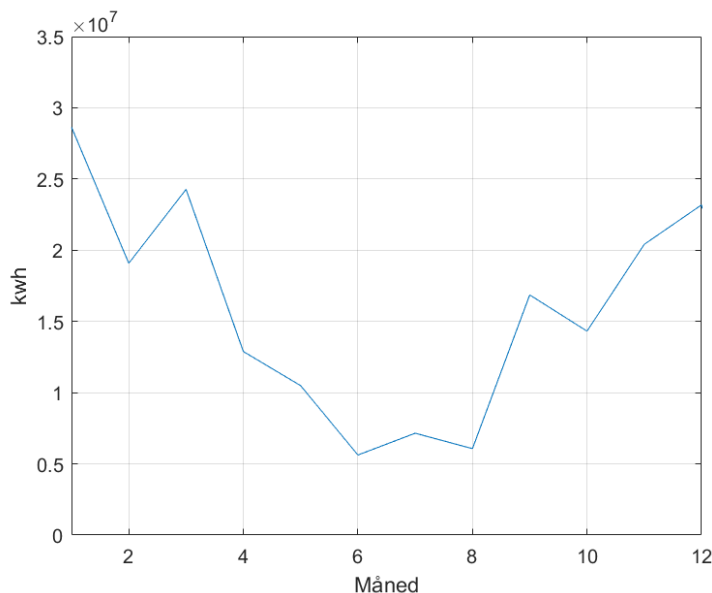
Figur 4.1: Alle parkens turbiners produksjon de første 24 timene i 2020.

En tabell av hver turbins produksjon er ikke mulig å vise, da det ikke er plass til 25 rekker med produksjonsdata. Tabell 4.1 er sammensatt av den totale produksjonen i vindparken hver måned, og viser det at vindparkens totale produksjon er høy i begynnelsen av året. Videre synker produksjonen i sommerhalvåret, før det igjen tar seg opp mot slutten av året. Grafen i figur 4.2 viser et plot av hvordan produksjonsmengden utvikler seg gjennom året.

Tabell 4.1: Vindparkens totale produksjon hver måned i 2020.

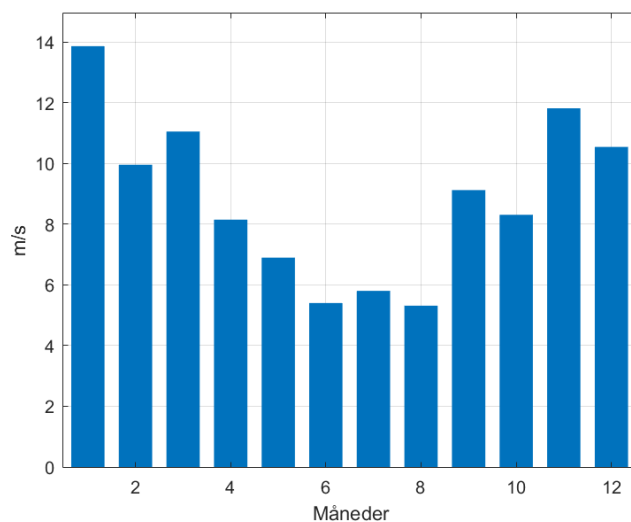
Måned	Total produksjon [kWh]
Januar	$2,8633e + 07$
Februar	$1,9083e + 07$
Mars	$2,4274e + 07$
April	$1,2888e + 07$
Mai	$1,0493e + 07$
Juni	$5,6206e + 06$
Juli	$7,1522e + 06$
August	$6,0686e + 06$
September	$1,6861e + 07$
Oktober	$1,4318e + 07$
November	$2,0414e + 07$
Desember	$2,3185e + 07$

Grafen i figur 4.2 viser plottet av produksjonsdataen for de ulike månedene. På x-aksen er årets måneder presentert, mens y-aksen inneholder produksjon målt i kWh. Dette danner grunnlaget for de videre scenarioene i oppgaven med tilhørende resultater.



Figur 4.2: Total gjennomsnittlig produksjon for månedene i 2020.

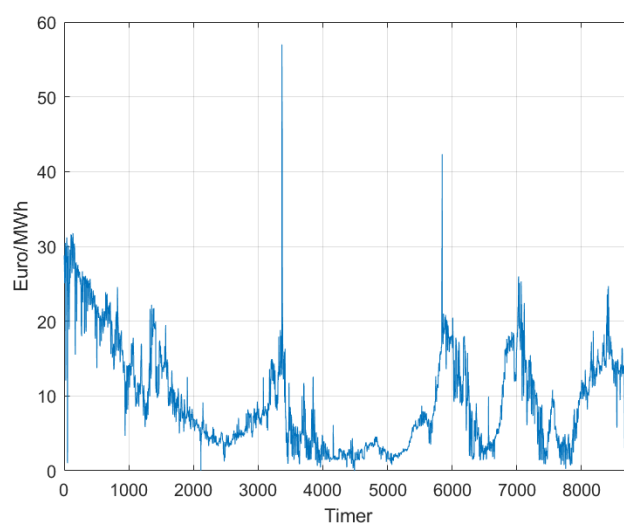
Grafen i figur 4.3 viser plottet av den gjennomsnittlige vindstyrken hver måned i 2020, og er utledet av algoritmen vist i vedlegg C. X-aksen representerer månedene fra januar til desember, mens y-aksen inneholder vindstyrken målt i m/s.



Figur 4.3: Gjennomsnittlig vindstyrke for hver måned i 2020.

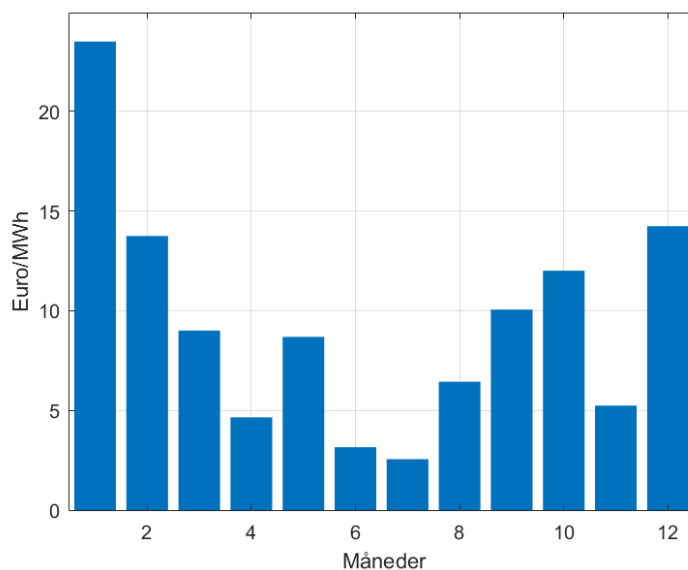
4.2 Spotpris

Historikken for spotprisene fra hele 2020 i det aktuelle området blir analysert i MATLAB, og en egenprodusert algoritme utledes, vist i vedlegg D og forklart i kapittel 3.2. Figur 4.4 viser hvordan spotprisen forandrer seg i løpet av året, og danner en graf som kan sammenlignes opp i mot produksjonstallene. Dette er videre beskrevet i scenario 2 av den hensikt å heve profitten på salg av kraft fra vindparken. Grafen viser Euro pr. MWh på y-aksen og antall timer i året på x-aksen.



Figur 4.4: Spotprisen hver time i hele 2020.

For å få en oversikt over den gjennomsnittlige spotprisen pr. måned i 2020 ble figur 4.5 utledet med den samme MATLAB-algoritmen vist i vedlegg D. Y-aksen viser verdien i Euro pr. MWh, mens x-aksen viser månedene i året.



Figur 4.5: Gjennomsnittlig spotpris hver måned i 2020.

4.3 Scenario 1 - Struping

Scenario 1 tar for seg aspektet med overproduksjon av kraft fra vindparken. For å skape en teoretisk struping av overskuddsenergi, lagrer et vanadium redoks flytbatteri all produksjon over 30 MWh hver time. For å simulere dette scenarioet er det utarbeidet en algoritme i MATLAB som er vist i vedlegg E, forklart nærmere i kapittel 3.4. Formålet med dette scenarioet er å undersøke hvor mye energi som må lagres i batteriet for å sikre en stabil produksjonsflyt i tilknytningspunktet mellom vindparken og kraftnettet.

I MATLAB-algoritmen opprettes det en tom matrise A. Etterhvert som algoritmen undersøker produksjonsdataen, henvises produksjonsmengden til gitt kolonne i matrisen, henholdsvis kolonne 1 for overproduksjon og kolonne 2 for underproduksjon. Overproduksjon medfører opplading av batteriet, mens underproduksjon medfører utlading av batteriet. Et utsnitt av produksjonsdataen for de seks første timene i 2020 er vist i tabell 4.2.

Tabell 4.2: Vindparkens totale produksjon de seks første timene i 2020.

Dato	Klokkeslett	Produksjon [kWh]
01.01.2020	00:00	51532,21
01.01.2020	01:00	45915,20
01.01.2020	02:00	43594,15
01.01.2020	03:00	29958,23
01.01.2020	04:00	18282,41
01.01.2020	05:00	26938,36

Ut ifra tabell 4.2 ser en at batteriet vil lade opp med den verdien som overskrider begrensningen på 30 MWh de tre første timene i året. De tre neste timene viser at vindparken produserer under kravet på 30 MWh. Her vil batteriet slå inn og mate den lagrede energimengden fra timene før, tilbake på nettet for å nå målet om å ha konstant 30 MWh i tilknytningspunktet.

Algoritmen, vist i vedlegg E, fører produksjonsdataen over i matrise A, vist i tabell 4.3. Her presenteres de verdiene av produksjonen som er over eller under 30 MWh, og disse føres inn i matrisen slik at det kan avleses når batteriet opplades og utlades.

Tabell 4.3: Opplading og utlading av batteriet i scenario 1 de seks første timene i 2020.

Dato	Klokkeslett	Opplading batteri [kWh]	Utlading batteri [kWh]
01.01.2020	00:00	21532,0	0
01.01.2020	01:00	15912,0	0
01.01.2020	02:00	13594,0	0
01.01.2020	03:00	0	41,77
01.01.2020	04:00	0	11718,0
01.01.2020	05:00	0	3061,6

Når vindparken ikke produserer noe kraft vil batteriet sende ut kraft tilsvarende 30 MWh, med forbehold om at batteriet har lagret tilstrekkelig energimengde fra tidligere timer. Dette inntreffer 14.04.2020 klokken 11:00, vist i tabell 4.4.

Tabell 4.4: Første periode med null produksjon fra vindparken i 2020, tilhørende scenario 1.

Dato	Klokkeslett	Produksjon [KWh]
14.04.2020	09:00	48435,0
14.04.2020	10:00	49265,0
14.04.2020	11:00	0
14.04.2020	12:00	0
14.04.2020	13:00	0
14.04.2020	14:00	0

Ved å sammenligne tabell 4.4 og tabell 4.5, ser en at batteriet fungerer slik det skal. Batteriet vil her tilføre 30 MWh med engang produksjonen stopper. Dette vil pågå helt til enten produksjonen starter opp igjen i vindparken eller til batteriet er utladet.

Tabell 4.5: Utlading av batteriet i scenario 1 ved produksjonsstopp.

Dato	Klokkeslett	Opplading batteri [kWh]	Utlading batteri [kWh]
14.04.2020	09:00	18435,0	0
14.04.2020	10:00	19265,0	0
14.04.2020	11:00	0	30000,0
14.04.2020	12:00	0	30000,0
14.04.2020	13:00	0	30000,0
14.04.2020	14:00	0	30000,0

I lange perioder med produksjon under 30 MWh fra vindparken, vil batteriet stå utladet over en lengre tid. Første periode med en fullstendig utlading av batteriet oppstår 26.04.2020 klokken 02:00, vist i tabell 4.6. Her vil batteriet utlades helt, og stå tomt frem til produksjonsmengden overskrider 30 MWh, og batteriet kan begynne å lagre overskuddsproduksjonen igjen.

Tabell 4.6: Første fullstendige utlading av batteriet i scenario 1 i 2020.

Dato	Klokkeslett	Opplading batteri [kWh]	Utlading batteri [kWh]
26.04.2020	00:00	0	23507,0
26.04.2020	01:00	0	5785,8
26.04.2020	02:00	0	0
26.04.2020	03:00	0	0

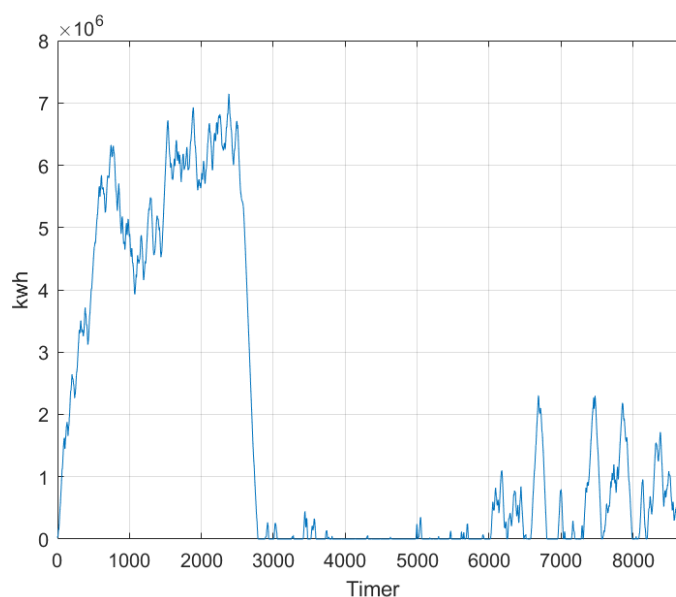
4.3.1 Batterikapasitet

Algoritmen vist i vedlegg E skaper en matrise testplot for batteriet som konstant oppdaterer energimengden i batteriet hver time, nærmere forklart i kapittel 3.4. Hver time produksjonen er større enn 30 MWh vil batteriet lades opp med denne verdien, og skrives inn i matrisen. Hver time produksjonen er lavere enn bestemmelsen vil batteriet utlades til bestemt verdi og matrisen vil oppdateres, vist i tabell 4.7.

Tabell 4.7: Mengden energi i batteriet i scenario 1 ved de seks første timene i 2020.

Dato	Klokkeslett	Lagret energi [kWh]
01.01.2020	00:00	21532,0
01.01.2020	01:00	37447,0
01.01.2020	02:00	51042,0
01.01.2020	03:00	51000,0
01.01.2020	04:00	39282,0
01.01.2020	05:00	36221,0

Grafen i figur 4.6 viser plottet til matrisen spotplot, og viser hvordan energimengden i batteriet endrer seg i løpet av 2020. X-aksen består av hver time i hele 2020, mens mengden lagret i batteriet er beskrevet på y-aksen.



Figur 4.6: Simulering av totalt lagret energi i batteriet, i scenario 1, gjennom året 2020.

De områdene hvor grafen vist i figur 4.6, når bunnpunktet på y-aksen tilsvarende tidspunkter hvor batteriet er fullstendig utladet. Det er ønskelig å finne toppunktet i grafen, av den grunn at her vil høyeste energimengde som oppholder seg i batteriet være. Denne verdien er avgjørende for å vite den nødvendige kapasiteten til batteriet, vist i tabell 4.8.

Tabell 4.8: Nødvendig kapasitet på installert batteri i scenario 1.

	kWh	MWh	GWh
Nødvendig kapasitet	7146300	7146,30	7,15

4.3.2 Lønnsomhet

Ved å lagre produksjonen som går over simulert struping på 30 MWh i batteriet vil det være mulig å oppnå en økonomisk gevinst. Produksjonsdataen som er lagret i batteriet gjennom hele 2020 blir overført til Excel, hvor det utføres en økonomisk analyse. Analysen er presentert i tabell 4.9, og viser fortjenesten ved salg av den lagrede energien i batteriet opp mot spotprisen. Verdien presenteres både i Euro og i Norske Kroner, og den gjennomsnittlige kursen for Euro er nærmere forklart i kapittel 2.3.

Tabell 4.9: Økonomisk gevinst ved lagring i batteriet, i scenario 1, for 2020.

	Euro (EUR)	Norske Kroner (NOK)
Økonomisk gevinst	472437,66	5067281,84

4.4 Scenario 2 - Salg opp mot spotpris

I scenario 2 er det ønskelig å undersøke om det er mulig å lagre all produksjonsmengde i tidsperioder med lav spotpris, og selge denne kraften sammen med den faktiske produksjonsmengden på tidspunkter med en gunstigere spotpris. Grunnen til at det er ønskelig å undersøke dette er for å se hvor stor økonomisk gevinst dette vil gi, og om det i et slikt tilfelle vil være lønnsomt å installere et vanadium redoks flytbatteri i vindparken.

Det er utarbeidet en algoritme som undersøker den tilsendte dataen for Bessakerfjellet vindparks produksjon i 2020, og spotprisen i det samme tidsrommet. Algoritmen er vist i vedlegg F, og prosessen bak hvordan algoritmen ble utledet forklares i kapittel 3.5. Algoritmen oppretter også en tom matrise B, hvor lagret produksjon og utlading skrives inn i matrisen etter hvert som algoritmen undersøker den gitte dataen. Algoritmen går gjennom data for alle timene i 2020, og det gir en matrise B med 8760 rader. Da det ikke vil være mulig å presentere den fulle matrisen, velges det ut deler av matrisen som visualiserer det totale resultatet.

Tabell 4.10: De seks første timene med produksjon i 2020, tilhørende scenario 2.

Dato	Klokkeslett	Lagret produksjon [kWh]	Solgt produksjon [kWh]
01.01.2020	00:00	0	51532,21
01.01.2020	01:00	0	45915,20
01.01.2020	02:00	0	43594,15
01.01.2020	03:00	0	29958,23
01.01.2020	04:00	0	18282,41
01.01.2020	05:00	0	26938,36

Tabell 4.10 viser situasjonen de første 6 timene i 2020. Kolonnen med lagret produksjon viser at det ikke ble lagret noe produksjon i denne tidsperioden, og solgt produksjon viser at all produksjonen ble sendt på kraftnettet og solgt som vanlig. Tabell 4.11 viser spotprisen for de seks første timene i 2020, i samme tidsrom som produksjonen i tabell 4.2 og tabell 4.10 er presentert.

Tabell 4.11: Spotprisen de seks første timene i 2020.

Dato	Klokkeslett	Spotpris [€/MWh]
01.01.2020	00:00	28,78
01.01.2020	01:00	28,45
01.01.2020	02:00	27,90
01.01.2020	03:00	27,52
01.01.2020	04:00	27,54
01.01.2020	05:00	26,55

Ved døgnskiftet til 2. januar 2020 faller spotprisen under 15 €/MWh, vist i tabell 4.12. Tabellen viser at vindparkens produserte kraft skal lagres i timene 00:00 og 01:00, før kraften igjen selges.

Tabell 4.12: Spotprisen i døgnskiftet 1. til 2. januar 2020.

Dato	Klokkeslett	Spotpris [€/MWh]
01.01.2020	23:00	24,81
02.01.2020	00:00	12,07
02.01.2020	01:00	13,13
02.01.2020	02:00	19,07
02.01.2020	03:00	21,12

Tabell 4.13 viser vindparkens totale produksjon på tidspunktet hvor tabell 4.12 viser at spotprisen stiger over 15 €/MWh. Tabell 4.14 viser hvordan batteriet oppfører seg i tilsvarende tidsrom som spotprisen i tabell 4.12. Når spotprisen synker under 15€/MWh lagres all produksjonen de gjeldende timene. Tabell 4.13 viser vindparkens totale produksjon på tidspunktet hvor tabell 4.14 viser en utlading av batteriet.

Tabell 4.13: Vindparkens produksjon ved første utlading, tilhørende scenario 2 i 2020.

Dato	Klokkeslett	Produksjon [kWh]
02.01.2020	02:00	52044,37

Tabell 4.14: Lagring og salg av produksjon i scenario 2, i døgnskiftet 1. til 2. januar 2020.

Dato	Klokkeslett	Lagret produksjon [kWh]	Solgt produksjon [kWh]
01.01.2020	23:00	0	53205,02
02.01.2020	00:00	49352,17	0
02.01.2020	01:00	50464,39	0
02.01.2020	02:00	0	151860,93
02.01.2020	03:00	0	49882,78

I noen tidsperioder holder spotprisen seg under 15 €/MWh i lengere perioder enn det som kommer frem i tabell 4.11 og tabell 4.12. Dette kommer tydelig frem i matrise B, hvor algoritmen lagrer hele vindparkens produksjon i tillegg til å vise hvor mye som selges på kraftnettet på ulike tidspunkter. Dette er beskrevet i kapittel 3.5. Tabell 4.15 viser et utsnitt fra en tidsperiode hvor det har blitt lagret energi i batteriet over lengre tid, og hva som skjer på tidspunktet hvor batteriet utlades.

Tabell 4.15: Lagring og salg av produksjon i scenario 2, etter periode i 2020 med mye lagring.

Dato	Klokkeslett	Lagret produksjon [kWh]	Solgt produksjon [kWh]
19.02.2020	10:00	1151,26	0
19.02.2020	11:00	328,25	0
19.02.2020	12:00	0,50	0
19.02.2020	13:00	0	3829284,03
19.02.2020	14:00	0	0

Tabell 4.15 viser de siste timene av en lengre tidsperiode hvor all produksjon har blitt lagret i batteriet. Klokken 13:00 stiger spotprisen over 15 €/MWh, og all energien i batteriet lades ut på dette tidspunktet. I dette tilfellet hadde vindparken stopp i hele produksjonen fra 13:00 til 15:00, slik at all den solgte produksjonen klokken 13:00 kun kommer fra utlading av batteriet. Siste rad i tabellen viser en av timene hvor det verken lagres eller selges kraft, grunnet stopp i produksjonen.

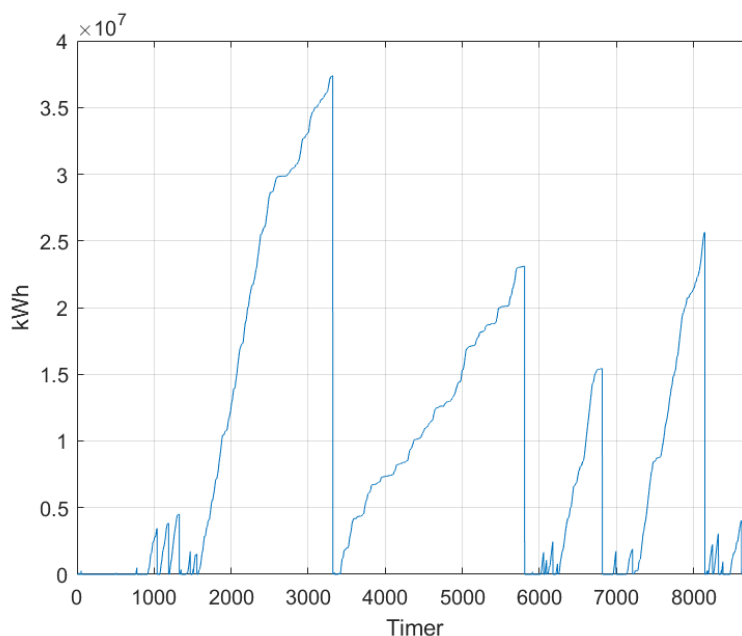
4.4.1 Batterikapasitet

Som vist i vedlegg F og beskrevet i kapittel 3.5, defineres en matrise spotplot som viser batteriets kontinuerlig oppdaterte verdi, og det forklares hvordan matrisen plottes. Batteriverdiene lagres i en kolonne hvor verdien settes lik 0 på tidspunktene hvor salget av produksjon går som vanlig og batteriet ikke lades opp. På tidspunkt hvor produksjon lagres i batteriet vil produksjonen skrives inn i kolonnen, og legges til eventuell allerede lagret energi i batteriet. Et utsnitt av matrisen vises for å illustrere dette i tabell 4.16, og et plot av matrisen er vist i figur 4.7.

Tabell 4.16: Energimengde i batteriet i scenario 2, på et vilkårlig tidspunkt i 2020.

Dato	Klokkeslett	Lagret energi [kWh]
15.09.2020	13:00	0
15.09.2020	14:00	1399,11
15.09.2020	15:00	0
15.09.2020	16:00	2814,44
15.09.2020	17:00	8317,65
15.09.2020	18:00	15504,21

Tabell 4.16 viser hvordan produksjonen gikk som vanlig klokken 13:00, og at batteriet lades opp av produksjonen den neste timen, grunnet en spotpris under 15 €/MWh. Neste time er spotprisen igjen over 15 €/MWh, og batteriet lades ut. I de kommende timene viser tabellen hvordan produksjonen igjen lagres i batteriet. Produksjonen lagres flere timer etter hverandre uten at batteriet lades ut, og produksjonen som lagres legges til eksisterende mengde i batteriet før verdien skrives inn i matrisen.



Figur 4.7: Simulering av totalt lagret energi i batteriet, i scenario 2, gjennom året 2020.

Grafen i figur 4.7 viser plottet av matrisen spotplot. Verdiene viser hele tiden hvor mye energi som er lagret i batteriet. Grafen viser hver time i løpet av 2020 på x-aksen, og energimengden i batteriet på det gitte tidspunktet på y-aksen. Produksjonen som inngår i grafen er kun produksjon på tidspunkter hvor spotprisen er lavere enn 15 €/MWh. Punktene på grafen hvor y-verdien momentant blir lik 0 viser tidspunktene hvor batteriet lades ut, og den lagrede produksjonen selges sammen med produksjonen på tilsvarende tidspunkt. Alle steder på grafen hvor y-verdien stiger viser tidspunkt og produksjonsmengde som lagres i batteriet.

Fra grafen, vist i figur 4.7, kommer det frem at det på noen tidspunkter er lagret store energimengder i batteriet. Det er ønskelig å finne den nøyaktige verdien på tidspunktet hvor det finnes mest energi i batteriet, for å finne nødvendig batterikapasitet. Tabell 4.17 viser nødvendig kapasitet i et installert batteri i vindparken ut ifra antakelsene tilhørende scenario 2.

Tabell 4.17: Nødvendig kapasitet på installert batteri i scenario 2.

	kWh	MWh	GWh
Nødvendig kapasitet	37388956	37388,96	37,39

4.4.2 Lønnsomhet

Når produksjon lagres på noen tidspunkter i stedet for å selges, er det ønskelig å undersøke hva dette gir av økonomisk fortjeneste. Det er gjennomført en økonomisk analyse i Excel, hvor

resultatene presenteres i tabell 4.18. Fremgangsmåten er beskrevet i kapittel 3.5. Tabellen viser fortjenesten ved salg av ordinær produksjon uten installert batteri, og fortjenesten av salget av produksjon med installert batteri. Verdiene presenteres både i Euro og i Norske Kroner. De to nederste radene i tabellen viser forskjellen i fortjeneste med og uten installert batteri.

Tabell 4.18: Økonomisk fortjeneste i scenario 2 ved salg av produksjon i 2020.

Total ordinær fortjeneste (EUR)	Total fortjeneste med batteri (EUR)
1982245	3329865
Total ordinær fortjeneste (NOK)	Total fortjeneste med batteri (NOK)
21261160	35715462
Økonomisk gevinst med batteri (EUR):	Økonomisk gevinst med batteri (NOK):
1347620	14454302

4.5 Scenario 3 - Optimering

Scenario 3 er en kombinasjon av scenario 1 og scenario 2. I likhet med scenario 1 gjelder antakelsen om at vindparken må strupe all produksjon over 30 MWh grunnet flaskehals på kraftnettet ut fra vindparken. I stedet for å kontinuerlig lade ut batteriet på tidspunkter hvor det produseres mindre enn 30 MWh, er det ønskelig å undersøke om det vil gi en større økonomisk gevinst å implementere spotpris slik som i scenario 2. Batteriet i vindparken skal med det ikke automatisk fylle opp utsendt kraftmengde for å nå 30 MWh i tilknytningspunktet, men avvente til en mer gunstig spotpris. Kravet for utlading er satt til en spotpris høyere enn 10 €/MWh.

I MATLAB er det utarbeidet en algoritme som undersøker gjeldende scenario. Algoritmen undersøker all produksjonsdataen for Bessakerfjellet vindpark i 2020, i tillegg til at den undersøker spotprisen i 2020 på tilsvarende tidspunkter. Algoritmen er vist i vedlegg G, og prosessen på hvordan den ble utarbeidet forklares nærmere i kapittel 3.6. Algoritmen for scenario 3 oppretter en tom matrise C. Etter hvert som algoritmen undersøker dataen, skriver den inn overproduksjonen som lagres i en kolonne, og mengde utladet kraft i en annen kolonne. Begge kolonnene samsvarer med dato og klokkeslett. På lik linje som de tidligere scenarioene inneholder matrise C 8760 rader, og det vil derfor presenteres utsnitt fra matrisen for å illustrere resultatet.

Tabell 4.19 viser situasjonen med lagring og salg av produksjon de første 6 timene i 2020. Kolonnen med lagret produksjon viser at det ble lagret produksjon i de tre første timene, og kolonnen med utladet produksjon viser en utlading de tre neste timene.

Tabell 4.19: Lagring og utlading i scenario 3 de seks første timene i 2020.

Dato	Klokkeslett	Lagret produksjon [kWh]	Utladet produksjon [kWh]
01.01.2020	00:00	21532,21	0
01.01.2020	01:00	15915,20	0
01.01.2020	02:00	13594,15	0
01.01.2020	03:00	0	41,77
01.01.2020	04:00	0	11717,59
01.01.2020	05:00	0	3061,64

Tabell 4.20 viser vindparkens produksjon en gitt periode hvor det både produseres mer og mindre enn 30 MWh. Fra tabellen kommer det frem at vindparkens totalproduksjon er større enn 30 MWh i timene 19:00 til 21:00, og energimengden lagres i batteriet. I timene 22:00 og 23:00 viser tabellen at det produseres mindre enn 30 MWh, og det er mulighet for utlading av batteriet slik at utsendt kraft når 30 MWh.

Tabell 4.20: Vindparkens produksjon noen timer i april 2020.

Dato	Klokkeslett	Produksjon [kWh]
13.04.2020	19:00	35710,44
13.04.2020	20:00	32055,33
13.04.2020	21:00	30070,44
13.04.2020	22:00	26771,87
13.04.2020	23:00	15546,39

Tabell 4.21 viser spotprisen i det samme tidsrommet som er vist i tabell 4.20. Tabellen viser en spotpris lavere enn 10 €/MWh gjennom hele perioden. I timene hvor tabell 4.20 viser en produksjon større enn 30 MWh har ikke spotprisen noen innvirkning på batteriet. I de to siste timene hvor vindparken produserer mindre enn 30 MWh og det er mulighet for utlading av batteriet, viser spotprisen i tabell 4.21 at utlading av batteriet skal avvantes.

Tabell 4.21: Spotprisen noen timer i april 2020.

Dato	Klokkeslett	Spotpris [€/MWh]
13.04.2020	19:00	3,60
13.04.2020	20:00	3,60
13.04.2020	21:00	3,62
13.04.2020	22:00	3,77
13.04.2020	23:00	3,80

Tabell 4.22 gir en oversikt over lagring av produksjon og utlading av batteriet i samme tidsrom som tabell 4.20 og tabell 4.21 tar for seg. Tabellen viser at batteriet lagrer overproduksjonen de timene hvor tabell 4.20 viser at vindparken produserer over 30 MWh. De to siste radene i tabell 4.20 viser et potensial for utlading av batteriet. Tabell 4.22 viser at batteriet ikke utlades på tilsvarende tidspunkt, grunnet spotpriser under 10 €/MWh vist i tabell 4.21.

Tabell 4.22: Lagring og utlading i scenario 3 noen timer i april 2020.

Dato	Klokkeslett	Lagret produksjon [kWh]	Utladet produksjon [kWh]
13.04.2020	19:00	5710,44	0
13.04.2020	20:00	2055,33	0
13.04.2020	21:00	70,44	0
13.04.2020	22:00	0	0
13.04.2020	23:00	0	0

Noen perioder i løpet av året vil det være tidsrom hvor vindparken produserer mindre enn 30 MWh over lengere tid, samtidig som spotprisen holder seg under 10 €/MWh. Et slikt tilfelle tilsvarende scenarioet vist i de to siste radene i tabell 4.22. Tabell 4.23 viser lagring og utlading av batteriet noen timer i mai. Timene tilkommer etter en lengre periode hvor verdiene i matrise C, beskrevet i kapittel 3.6, er lik null både i kolonnen for oppladning og for utlading.

Tabell 4.23: Lagring og utlading i scenario 3 noen timer i mai 2020.

Dato	Klokkeslett	Lagret produksjon [kWh]	Utladet produksjon [kWh]
08.05.2020	05:00	0	0
08.05.2020	06:00	0	0
08.05.2020	07:00	0	0
08.05.2020	08:00	0	25968,3

Tabell 4.24 viser et utsnitt av vindparkens produksjon og spotprisen i samme tidsrom som i tabell 4.23. Tabell 4.23 viser at det ikke lagres energi i batteriet i dette tidsrommet, og tabell 4.24 viser at vindparken i hele det tilsvarende tidsrommet produserte under 30 MWh og at det er mulighet for utlading. Spotprisen i tabell 4.24 holder seg under 10 €/MWh frem til siste rad, hvor spotprisen ligger over grensen for å avvente utlading. På dette tidspunktet ser en også at det produseres svært lite kraft i vindparken, og tabell 4.23 viser at det er tilstrekkelig energimengde i batteriet til å tilføre resterende kraft for å nå en verdi på 30 MWh som selges på kraftnettet.

Tabell 4.24: Produksjon og spotpris noen timer i mai 2020.

Dato	Klokkeslett	Parkens produksjon [kWh]	Spotpris [€/MWh]
08.05.2020	05:00	21563,57	7,60
08.05.2020	06:00	17572,01	8,05
08.05.2020	07:00	23534,02	9,35
08.05.2020	08:00	4031,70	12,51

4.5.1 Batterikapasitet

Algoritmen vist i vedlegg G og beskrevet i kapittel 3.6, definerer en matrise D lik batteriets kontinuerlige oppdaterte verdi. Batteriverdiene lagres i én kolonne i matrisen. Verdiene undersøkes for hver time gjennom 2020, og algoritmen legger til og trekker fra verdiene som kontinuerlig tilføres eller utlades fra batteriet. Tabell 4.25 viser et utsnitt av matrisen.

Tabell 4.25: Energimengde i batteriet i scenario 3, tidlig januar 2020.

Dato	Klokkeslett	Lagret energi [kWh]
09.01.2020	10:00	2646146,25
09.01.2020	11:00	2620426,84
09.01.2020	12:00	2601572,59
09.01.2020	13:00	2601867,72
09.01.2020	14:00	2606627,51

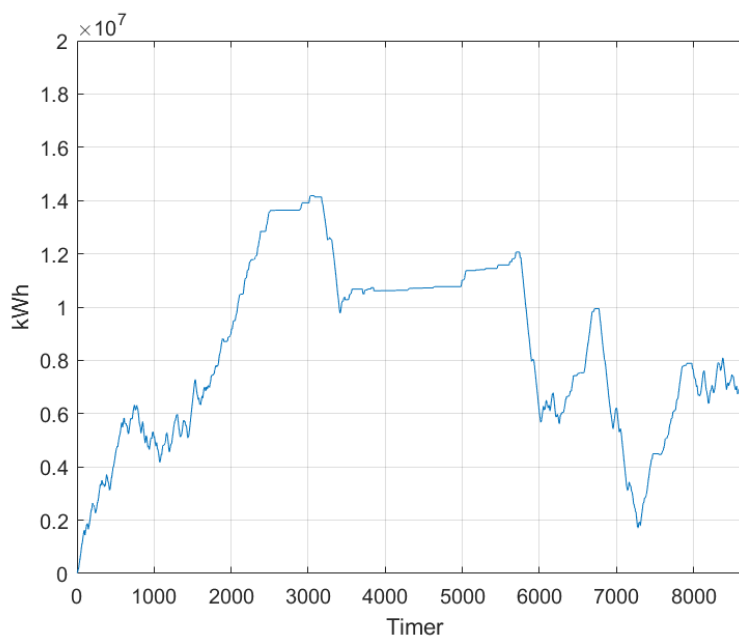
Tabell 4.25 viser energimengden i batteriet på et vilkårlig tidspunkt, og tabell 4.26 viser oppladning og utlading av batteriet i tilsvarende tidsrom. Fra tabell 4.26 kommer det frem at batteriet både lagrer overproduksjon og lader ut energi i dette tidsrommet. En sammenligning med tabell

4.25 viser at energimengden i batteriet stiger og synker samsvarende med verdiene på oppladning og utlading i tabell 4.26.

Tabell 4.26: Lagring og salg av produksjon i scenario 3, tidlig januar 2020.

Dato	Klokkeslett	Lagret produksjon [kWh]	Utladet produksjon [kWh]
09.01.2020	10:00	125,73	0
09.01.2020	11:00	0	25719,41
09.01.2020	12:00	0	18854,25
09.01.2020	13:00	295,13	0
09.01.2020	14:00	4759,79	0

Algoritmen vist i vedlegg G plottet verdiene i matrise D, for å få et visuelt bilde på energimengden i batteriet. Den plottede grafen er vist i figur 4.8, og fremgangsmåten er beskrevet i kapittel 3.6. Grafen viser energimengde på y-aksen, og timer i løpet av året på x-aksen. Stedene på grafen hvor verdien på y-aksen stiger, viser tidspunkter hvor vindparken har produsert mer enn 30 MWh og overproduksjonen lagres i batteriet. Stedene på grafen hvor verdien på y-aksen synker, viser tidspunkter hvor vindparken har produsert mindre enn 30 MWh samtidig som spotprisen er over 10 €/MWh, og batteriet lader ut gjenstående mengde for å nå 30 MWh som kan selges på kraftnettet.



Figur 4.8: Simulering av totalt lagret energi i batteriet, i scenario 3, gjennom året 2020.

Fra grafen vist i figur 4.8 kommer det frem at batteriet på flere tidspunkter har store energimengder lagret samtidig. Det er ønskelig å finne den største lagrede energimengden, slik at en kan finne nødvendig batterikapasitet. Tabell 4.27 viser nødvendig kapasitet på et installert batteri i vindparken, ut ifra antakelsene tilhørende scenario 3.

Tabell 4.27: Nødvendig kapasitet på installert batteri i scenario 3.

	kWh	MWh	GWh
Nødvendig kapasitet	14182434	14182,43	14,18

4.5.2 Lønnsomhet

Det er ønskelig å undersøke den økonomiske gevinsten installasjonen av et slikt vanadium redoks flytbatteri vil gi. Det er utført en økonomisk analyse i Excel, og resultatet presenteres i tabell 4.28. Fremgangsmåten er beskrevet i kapittel 3.6. Den økonomiske fortjenesten er beregnet ut ifra salget av overproduksjonen lagret i batteriet, på tidspunkter hvor vindparken produserer under 30 MWh samtidig som spotprisen er høyere enn 10 €/MWh. Tabellen presenterer fortjeneste i Euro og i Norske Kroner.

Tabell 4.28: Økonomisk gevinst i scenario 3, ved lagring i batteriet i 2020.

	Euro (EUR)	Norske Kroner (NOK)
Økonomisk gevinst	637684,9	6839680,69

5 Diskusjon

I denne delen av rapporten vil det bli diskutert rundt resultatene fra de ulike scenarioene, samt resultatene fra vindparkens produksjon og spotprisen på de gjeldende salgstidspunktene. Resultatene fra MATLAB-algortimene vil diskuteres opp mot de økonomiske analysene, og basert på det totale utfallet vil det bli gjort en teknisk-økonomisk case-analyse av vindparken.

5.1 Antakelser

Da MATLAB-algortimene skulle utarbeides, var det nødvendig å gjøre en del antakelser rundt batteriet. Enkelte av antakelsene som er blitt gjort gjelder spesifikt for de enkelte scenarioene, mens andre antakelser gjelder generelt for hele oppgaven. I denne delen vil det diskuteres rundt antakelsene som gjelder for hele oppgaven.

Antakelsen om å se på vindparkens 25 turbiner som én produksjonsenhet, ble tatt med bakgrunn i plotet vist i figur 4.1. Grafen viser produksjonen fra vindparkens 25 turbiner de første 24 timene i 2020. Etter samtale med Trønderenergi ble det enighet om at det ville bli ugunstig å se på hver enkelt turbin hver for seg, og ble konkludert med at hele vindparken skal sees på som én produksjonsenhet.

Etter samtaler med både Trønderenergi og Bryte AS angående batteriantakelser, var det konsensus om å ikke vektlegge batteriets kjemi og algoritmer innad i oppgaven. Ut ifra dette ble det bestemt at batteriet har en egen innebygd algoritme som selv vet hvilke tidspunkter batteriet skal lades opp og lades ut. På den måten unngås det å måtte ta manuell styring og kontroll i betrakning. Det ble også antatt at den installerte effekten til batteriet skulle være stor nok til å dekke behovene for batterikapasitet funnet i de forskjellige scenarioene, slik at det i etterkant kan diskuteres om en slik installasjon vil være lønnsom og mulig å få til, og hvilke endringer som eventuelt kan være nødvendige.

Tilsendt data fra Trønderenergi, brukt som utgangspunkt i beregningsmodellene, er fra 2020. Dette gjelder både produksjonsdata og spotpris. Å kunne forutsi nøyaktig produksjonsmengde for vindparken i kommende år, og hva spotprisen vil komme til å være på tilsvarende tidspunkt er ikke mulig, og det ble derfor konkludert med at de tilsendte dataene vil være representative nok til å finne ut om installasjon av et vanadium redoks flytbatteri vil lønne seg eller ikke. Det ble derfor antatt at både produksjon og spotpris vil være tilsvarende lik i fremtiden som i 2020. Når det gjelder omgjøring fra Euro eller USD til Norske Kroner gjelder samme utfordring med å forutsi fremtidige verdier og valutaendringer, og det ble antatt at valutakursen mellom Norske Kroner og Euro i fremtiden vil følge den gjennomsnittlige kursen i 2020. Den samme antakelsen ble tatt for omgjøring fra USD til Norske Kroner. Antakelsene om at dataene, spotprisen og valutakursen for 2020 er representativ for fremtidig vurdering ble tatt i samarbeid med Trønderenergi.

Det ble gjort antakelser om at spotprisen for 2020 og dataen over vindstyrke på Bessakerfjellet vindpark for 2020 vil være representativt for tidligere år, i tillegg til kommende år. Dette ble gjort i samarbeid med intern veileder fra NTNU, og det ble gjort på bakgrunn av den tilsendte dataen. Gruppen har kun tilgjengelig data for 2020, slik at det er umulig å si noe om tendenser eller avvik. For å få en case-analyse som kan brukes på generell basis i flere vindparker enn kun Bessakerfjellet vindpark som det er tatt utgangspunkt i, ble det antatt at spotprisen og vinddataen som presenteres følger en trend basert på antakelsen om at dataen er tilsvarende lik tidligere år.

Kostnadsbilde til vanadium redoks flytbatterier er i stadig utvikling, og prisene synker etterhvert som slike batterier forskes mer på. Dette medfører en større sannsynlighet for at denne typen batterier er fremtidens energilagringssystem for lagring on-site ved store produksjonsenheter. I samråd med Bryte AS ble det tatt en beslutning på hvilken kostnadsramme for batteriet denne oppgaven skulle belage seg på. Oppgaven belager seg på en samlet kostnad på 0,2 USD per kWh for vanadium redoks flytbatteriet som er prosjektert inn i de ulike scenarioene fra Bessakerfjellet vindpark.

5.2 Produksjon

Ved hjelp av antakelsen om å se på alle vindparkens turbiner som én produksjonsenhet, nevnt i kapittel 5.1, kunne den totale produksjonen brukes videre i resultatene. Ved å legge sammen den totale produksjonen hver time i 2020, vil aspektet med at eksempelvis en enkelt turbin er slått av grunnet vedlikehold, ikke ha en vesentlig påvirkning da batteriet her vil slå inn å kompensere for produksjonen til denne turbinen.

Ved å sammenligne figur 4.2 og figur 4.3 kan en se hvordan produksjonen henger sammen med vindstyrken ved Bessakerfjellet vindpark. I perioder med lav vindstyrke, og dermed lav produksjon, vil behovet for energilagring være stort. Det er under disse periodene vanadium redoks flytbatteriet vil hjelpe til med å holde en jevn flyt i tilknytningspunktet. I periodene med høy produksjon og vindstyrke, vil batteriet kunne lagre energi som kan brukes i de periodene med lav produksjon.

5.3 Spotpris

Som beskrevet i kapittel 3.2 ble det i MATLAB utarbeidet en algoritme for å analysere spotprisen for 2020. Figur 4.4 viser et plot av spotprisen hver time i 2020. Selv om spotprisen varierer kraftig i enkelte timer, observeres det i stor grad en trend. Trenden viser en spotpris forholdsvis høy på starten av året, og at den synker mot sommerhalvåret. Videre viser grafen at spotprisen mot slutten av året stiger igjen. En sammenligning av trenden i figur 4.4 med grafen i figur 4.5, gjør den sesongbaserte endringen enda tydeligere. Figur 4.5 viser et plot av gjennomsnittlig spotpris for hver måned i 2020. Sett bort ifra de største avvikene i figur 4.4, følger den gjennomsnittlige spotprisen i figur 4.5 tendensen i figur 4.4.

Observasjonene fra sammenligningen av figur 4.4 og figur 4.5 viser at utviklingen til spotprisen gjennom året stort sett ser ut til å følge årstidene. Spotprisen er høyeste i vintermånedene og lavest i sommermånedene, med enkelte avvik. Da antakelsene rundt spotpris i scenario 2 og scenario 3 ble utledet, ble tendensen til spotprisens utvikling tatt i betraktning. Det ble gjort antakelser slik at ikke all lagring og salg av produksjon skulle bli sesongbasert i samsvar med spotprisen, men fremdeles kunne finne sted store deler av året.

5.4 Scenario 1 - Struping

Scenario 1 omfatter struping av produksjon, og lagring av overskuddsproduksjon. Flere vindparker i Norge og i verden må i dag strupe produksjonen sin grunnet kapasiteten på kraftnettet i tilknytningspunktet. Spesielt områder hvor det finnes flere vindparker med en felles forbindelse til kraftnettet, kan dette være et problem på grunn av at det kan oppstå flaskehals. Som beskrevet i kapittel 2.1.2, er Fosen et eksempel på en slik flaskehals. Kraftnettet ut fra Fosen har ikke kapasitet til at alle vindparkene kan selge all produksjon når de produserer for fullt, noe

som medfører at enkelte av vindparkene vil måtte strupe produksjonen sin. Selv om dette ikke er et faktum for Bessakerfjellet vindpark, ble det i samarbeid med Trønderenergi bestemt å anta en tilsvarende gjeldende situasjon også her. På den måten ble oppgaven en case-analyse som kan benyttes for alle parker hvor struping er en utfordring. I scenario 1 ble det antatt at Bessakerfjellet vindpark er nødt til å strupe all produksjon over en totalproduksjon på 30 MWh. Verdien ble bestemt etter rådføring med Trønderenergi. Det ble antatt at vindparken med et installert vanadium redoks flytbatteri produserer som vanlig, og at all produksjon over 30 MWh lagres i batteriet. Videre ble det antatt at det var ønskelig å hele tiden selge så mye produksjon som mulig til kraftnettet. Den lagrede produksjonen selges sammen med den faktiske produksjonen på tidspunkter hvor vindparken ikke produserer 30 MWh, for å nå denne verdien.

Tabell 4.3 viser hvordan batteriet oppfører seg de seks første timene i 2020. Ved å sammenligne tabell 4.2 med tabell 4.3 ser en at batteriet ble ladet opp de tre første timene på grunn av at produksjonen her overskridet 30 MWh. De kommende tre timene lader batteriet ut på kraftnettet. I slike situasjoner vil batteriet være til stor hjelp for å få en jevn flyt i tilknytningspunktet ut på kraftnettet fra vindparken.

Ved å sammenligne tabell 4.4 og tabell 4.5, ser en at det simulerte batteriet fungerte slik det skal. Batteriet tilfører 30 MWh med en gang produksjonen stopper. Dette vil pågå hver time helt til enten produksjonen starter opp igjen i vindparken eller at batteriet blir utladet. Dataen i tabell 4.6 viser at batteriet på dette tidspunktet vil lade fullstendig ut. Ved å se på teorien i kapittel 2.5.2 vil ikke den fullstendige utladingen av batteriet påvirke egenskapene til batteriet. Vanadium redoks flytbatterier har en selvutlading som kan neglisjeres og dermed vil ikke dette medføre noen problemer. Det vil også være fordelaktig at denne typen batteri tåler veldig mange sykluser i løpet av sin levetid.

Algoritmen vist i vedlegg E, beskrevet i kapittel 3.4, oppretter også en matrise som viser energimengden lagret i batteriet hver time i løpet av 2020. Hver gang produksjonsmengden var over bestemt verdi, ble denne energimengden lagt sammen med nåværende energi i batteriet. På tidspunkter hvor batteriet ble ladet ut, ble den utladede verdien trukket fra den lagrede verdien i batteriet, og den nye verdien ble skrevet inn i matrisen. Et utsnitt av denne matrisen er vist i tabell 4.7.

Figur 4.6 viser et plot over energimengden lagret i batteriet hver time i 2020. Grafen dannet et klart bilde av at det produseres mye kraft den første tredjedelen av 2020. Ved å sammenligne figur 4.6 og figur 4.2 kan en se at produksjonen den første delen av 2020 startet høyt, for så å få en synkende produksjonsmengde inn mot sommeren. Dette har en klar sammenheng med vindstyrken ved Bessakerfjellet vindpark, presentert i figur 4.3. Ved det tidspunktet grafen i figur 4.6 faller ned til null på y-aksen, viser tidspunktet hvor batteriet ble ladet fullstendig ut. Dette forekommer i perioder hvor produksjonen vist i figur 4.2 er lav, og dermed også vindstyrken i figur 4.3 er lav.

Toppunktet i grafen, vist i figur 4.6, viser hvor mye energi batteriet må ha kapasitet til å lagre. Tabell 4.8 som er beskrevet i kapittel 3.4, er utledet for å finne den totale kapasiteten et installert vanadium redoks flytbatteri på Bessakerfjellet vindpark må ha. Tabellen viser at nødvendig kapasitet må være på 7,15 GWh. Dette representerer den høyeste produksjonsmengden som er lagret i batteriet i løpet av en time i 2020. Et vanadium redoks flytbatteri i dag har ikke denne kapasiteten tilgjengelig. Dagens høyeste kapasitet på et slikt batteri er forklart nærmere i kapittel 2.5.2, og er på maksimalt 800 MWh. Dette tilsier at med de antakelsene som ble tatt

i scenario 1, vil det ikke være mulig å gjennomføre dette scenarioet. En sammenligning mellom det maksimale batteriet og batteriet i scenario 1, viser at kapasiteten i det simulerte batteriet er nesten 9 ganger så stort som det vanadium redoks flytbatteriet med høyeste kapasiteten i verden i dag. Dette gjør scenarioet veldig usannsynlig, og umulig å få til med dagens batteristandarder på vanadium redoks flytbatterier. Ved å øke antakelsen om at all produksjon over 30 MWh skal lagres til en høyere verdi, vil kapasiteten på batteriet synke og det er mulig å optimalisere dette slik at det fysisk samsvarer med batteriteknologien i dagens marked. Dette er forklart nærmere i kapittel 5.8.

Tabell 4.9 viser den økonomiske fortjenesten ved installasjon av et vanadium redoks flytbatteri i Bessakerfjellet vindpark med de antakelsene som ble gjort. Resultatet viser at dette vil gi en økonomisk fortjeneste på 5,07 millioner Norske Kroner i året. Om dette er lønnsomt er avhengig av kostnaden av et slik batteri i denne størrelsesordenen, og inntjeningen hvert år sett opp mot levetiden.

I kapittel 2.5.2 presenteres en graf, vist i figur 2.11, som viser kostnaden for et vanadium redoks flytbatteri presentert pr. kWh installert kapasitet i 2017. Figuren viser at kostnaden var på 0,2 USD pr. kWh i 2017. Ved å se på den totale kapasiteten batteriet i scenario 1 trenger, ble kostnaden på batteriet 1,43 millioner USD. Kapittel 3.3 beskriver antakelsen om at gjennomsnittlig valutakurs for Norske og USD i 2020 er den samme for de følgende årenene etter 2020. Med bakgrunn i denne antakelsen vil kostnaden på et installert vanadium redoks flytbatteri med tilstrekkelig kapasitet til å dekke behovet i scenario 1, være på 13,46 millioner Norske Kroner.

Et vanadium redoks flytbatteri har en levetid på omlag 20 år, slik som beskrevet i kapittel 2.5.2. Med en årlig inntjening på 5,07 millioner Norske Kroner, vil dette medføre en total fortjeneste på 101,4 millioner Norske Kroner, sett bort ifra kostnadene til batteriet. Selv med installasjonskostnaden på batteriet tatt i betraktning, vil scenario 1 skape en god økonomisk gevinst. Så lenge batterikostnaden er lavere enn fortjenesten, vil lagring av overskuddskraft som ellers hadde måtte blitt strupet være økonomisk lønnsomt.

Med bakgrunn i at dette er en case-analyse, og dermed ikke et reelt tilfelle, vil dette scenarioet vise hvordan det er mulig å redde overskuddskraft. I fremtiden er det fullt mulig at slike batterier er utbredt på markedet, og da vil lagring av overskuddsenergi som ellers ville gått til spille være en god investering. Vindkraft er en fornybar energikilde og ved å få ut potensialet til vindturbinene, vil dette kunne bidra til at vindenergi får en større andel i verdens kraftproduksjon.

5.5 Scenario 2 - Salg opp mot spotpris

Scenario 2 tar for seg lagring og salg av produksjon fra Bessakerfjellet vindpark utelukkende ut ifra spotpris. Spotprisen kan variere mye gjennom året, og det var ønskelig å kunne selge mest mulig av produksjonen ved en gunstigere spotpris enn det som ved noen tilfeller forekommer. Som beskrevet i kapittel 3.5, ble det tatt utgangspunkt i den gjennomsnittlige spotprisen i 2020. Gjennomsnittet i 2020 var 9,46 €/MWh. Spotprisen varierer ofte i store trekk med årstidene, og for å unngå å få en sesongbasert lagring- og utladingsprosess, ble det bestemt en spotpris litt høyere enn gjennomsnittet, på 15 €/MWh. Det ble derfor antatt at batteriet i vindparken skulle lagre all produksjon i perioder hvor spotprisen var lavere enn 15 €/MWh. Batteriet skulle utlades, og selge den utladede produksjonen sammen med den faktisk produserte kraften på tidspunkter hvor spotprisen var over 15 €/MWh. Dette betyr at batteriet vil lade seg helt ut så fort spotprisen stiger over den satte lagringsgrensen. For å muliggjøre dette, var det behov for en ny antakelse.

Det ble antatt at kapasiteten på kraftnettet ut fra Bessakerfjellet vindpark ikke har en øvre grense, slik at det ville være mulig å selge all lagret produksjon på ett og samme tidspunkt.

Dataen i tabell 4.10 viser en oversikt over situasjonen i Bessakerfjellet vindpark de første seks timene i 2020. Tabellen viser en oversikt over lagret produksjon i batteriet og solgt produksjon til kraftnettet i dette tidsrommet. Dataen i tabell 4.10 kan sammenlignes med dataen i tabell 4.11 og tabell 4.2. Tabellene viser henholdsvis spotprisen og vindparkens totale produksjon i samme tidsrom, vist i tabell 4.10. Tabell 4.11 viser at spotprisen i den gitte perioden hele tiden var høyere enn 15 €/MWh, spotprisen som ble satt som nedre grense for salg av kraft fremfor å lagre produksjonen. Tabell 4.2 viser Bessakerfjellet vindparks faktiske produksjon de første seks timene i januar 2020. Oversikten over spotprisen i tabell 4.11 tilsier at ingen produksjon i det gitte tidsrommet skulle lagres i batteriet, men selges på kraftnettet som vanlig. Kolonnen som viser lagret produksjon i tabell 4.10 viser at dette også var tilfellet. Kolonnen i tabell 4.10 som viser solgt produksjon samsvarer fullstendig med oversikten over faktisk produksjon i tabell 4.2. Det betyr at batteriet ikke lagret noe av produksjon, men at alt ble solgt på kraftnettet, og batteriet opererer som ønsket.

Tabell 4.12 viser spotprisen i døgnskiftet 1. til 2. januar 2020. I denne tidsperioden endret spotprisen seg fra å være over 15 €/MWh til å synke under, for så å stige over igjen. For batteriet betyr dette at det både skulle lades opp og lades ut i det gitte tidsrommet. Det skulle foregå en oppladning i timene fra 00:00 og 01:00, og utlading i de kommende to timene. Tabell 4.13 og tabell 4.14 viser henholdsvis vindparkens faktiske produksjon klokken 02:00 hvor batteriet skulle lades ut etter to timer med oppladning, og situasjonen i vindparken med lagring og salg av produksjon i tilsvarende tidsrom som vist i tabell 4.12. Tabell 4.14 viser at batteriet lagret all produksjon på samme tidspunkt som tabell 4.12 viser en spotpris under 15 €/MWh. En sammenligning av tabell 4.13 og rad 5 tabell 4.14 viser at i tillegg til å selge faktisk produsert kraft som vanlig på tidspunktet hvor spotprisen steg over 15 €/MWh i tabell 4.12, ble all energien som var lagret i batteriet utladet og solgt samtidig. Videre viser siste rad i tabell 4.14 at salg av produksjon gikk som vanlig da batteriet var utladet og det ikke ble tilført ny kraft.

Til forskjell fra situasjonen presentert i tabell 4.14 var det i løpet av 2020 lengre tidsperioder hvor spotprisen holdt seg under 15 €/MWh. Dette medførte at alt av vindparkens produksjon ble lagret i batteriet disse periodene. Dette hendte flere ganger i løpet av året, og tabell 4.15 viser situasjonen i vindparken på et tidspunkt etter en lengre periode med lagring. Nest nederste rad i tabellen, klokken 13:00, viser hvor mye energi som ble ladet ut fra batteriet og solgt på kraftnettet på dette tidspunktet. Vindparken hadde i dette tidsrommet en stopp i produksjonen, slik at all solgt produksjon klokken 13:00 kom fra lagret energi i batteriet. Dataen i tabell 4.15 viser at den utladede mengden kraft på det gitte tidspunktet var 3,83 GWh. Denne verdien vil med dette være verdien på energimengden lagret i batteriet samtidig på tidspunktet rett før utlading.

Algoritmen for scenario 2, beskrevet i kapittel 3.5, oppretter også en matrise som viser den kontinuerlige verdien lagret i batteriet. For hver gang en ny energimengde ble lagret i batteriet, ble denne lagt til nåværende lagret energi, og skrevet inn i matrisen. På tidspunkter hvor batteriet ble ladet ut ble den utladede verdien trukket fra den lagrede energimengden i batteriet, og den nye verdien ble skrevet inn i matrisen. Tabell 4.16 viser et utsnitt av denne matrisen et vilkårlig tidspunkt i 2020. Tabellen viser et tidsrom hvor batteriet både ble ladet opp og utladet. Det at batteriet både ble ladet opp og ladet ut tilsier at spotprisen i tilsvarende tidsrom varierte mellom å være høyere og lavere enn 15 €/MWh.

Figur 4.7 viser et plot over energimengden som på ethvert tidspunkt var lagret i batteriet i løpet av 2020. Grafen illustrer på hvilke tidspunkter spotprisen var under 15 €/MWh og all produksjon ble lagret, og tidspunktene hvor spotprisen var over 15 €/MWh og batteriet ble helt utladet. Figur 4.4 viser hvordan spotprisen var hver time i 2020. En sammenligning av spotprisen i figur 4.4 og mengden lagret energi i figur 4.7 viser en tydelig sammenheng mellom årstider og energimengde lagret på et tidspunkt. En kan observere at det i figur 4.7 ble lagret store mengder energi i lange perioder uten utlading på våren, gjennom sommeren og tidlig høst, på de samme tidspunktene som plotet i figur 4.4 viser at spotprisen var lav. Tidspunktene hvor plotet i figur 4.7 faller loddrett ned til null, viser tidspunkter hvor batteriet ble ladet helt ut. Sett opp mot figur 4.4, ser en at utladingen av batteriet var på de samme tidspunktene hvor spotprisen brøt med tendensen i periodene hvor den over lengre tid lå under 15 €/MWh, og steg over 15 €/MWh på enkelte tidspunkt.

Grafen i figur 4.7 viser at et installert batteri i en vindpark med antakelsene som scenario 2 tar for seg, vil føre til at batteriet lades fullstendig ut mange ganger i løpet av året. Som beskrevet i kapittel 2.5.2 har vanadium redoks flytbatterier en begrensning på 12000 – 14000 sykluser i løpet av sin levetiden. Dette betyr at selv om de gitte antakelsene i scenario 2 medfører flere fullstendige utladninger i løpet av et år, vil det ikke føre til en forkortet levetid av batteriet.

Den høyeste toppen i plottet vist i figur 4.7, viser hvor mye energi som på det meste var lagret på et og samme tidspunkt i batteriet i løpet av 2020. Denne verdien er interessant å finne, da den vil representere nødvendig kapasitet på et installert batteri i Bessakerfjellet vindpark ut ifra antakelsene tilhørende scenario 2. I kapittel 3.5 er det beskrevet hvordan denne verdien ble funnet, og resultatet presenteres i tabell 4.17. Tabellen viser at nødvendig kapasitet på et installert batteri vil være 37,39 GWh, da dette var den største mengden energi lagret i batteriet samtidig i 2020. En slik størrelsesorden er langt større enn noe batteri som finnes i dag, uavhengig av batteritype. I kapittel 2.5.2 beskrives batteriet som i dag har den største installerte kapasiteten i verden, på 800 MWh. Dette er et vanadium redoks flytbatteri, er plassert ved ett kraftverk i Kina. En sammenligning med kapasiteten som er nødvendig på et tilsvarende batteri i dette scenarioet, viser at scenario 2 trenger en installert batterikapasitet nesten 48 ganger så stort som det største batteriet i verden i dag. Dette gjør scenarioet veldig usannsynlig, og umulig å få til med dagens batteristandarder.

Tabell 4.18 viser den økonomiske fortjenesten ved installasjon av et vanadium redoks flytbatteri i Bessakerfjellet vindpark, i forhold til at produksjonen ble solgt som vanlig. Resultatet viser at lagring og salg av produksjon, slik som det ble gjort i scenario 2, vil gi en årlig økonomisk gevinst på 14,45 millioner Norske Kroner. Dette sett opp i mot den faktiske fortjenesten i 2020 uten et installert batteri. Lønnsomheten ved en slik installasjon vil være avhengig av kostnaden av et slikt batteri, og inntjeningen hvert år sett opp mot levetiden.

I kapittel 2.5.2 presenteres en graf i figur 2.11, som viser kostnadene til et vanadium redoks flytbatteri pr. kWh installert kapasitet i 2017. Figuren viser at prisen for vanadium redoks flytbatterier i 2017 var 0,2 USD pr. kWh. Ut ifra den nødvendige kapasiteten til batteriet i scenario 2, vist i tabell 4.17, vil dette medføre en batterikostnad på 7,48 millioner USD. Denne verdien tar forbehold om antakelsene beskrevet i kapittel 3.3, at spotprisen og Bessakerfjellet vindparks produksjon vil være lik i fremtiden som den var i 2020. Kapittel 3.3 beskriver også antakelsen om at gjennomsnittlig valutakurs for Norske Kroner og USD i 2020 er gjeldende for alle år. Denne antakelsen tatt i betraktning gir at kostnaden på et installert vanadium redoks

flytbatteri med tilstrekkelig kapasitet til å dekke behovet i scenario 2, vil være på 70,4 millioner Norske Kroner.

I kapittel 2.5.2 står det beskrevet at en kan regne med at et vanadium redoks flytbatteri vil ha en levetid på 20 år. Med en årlig inntjening på 14,45 millioner Norske Kroner pr. år, vil et vanadium redoks flytbatteri føre til en økonomisk fortjeneste på 289 millioner Norske Kroner i løpet av batteriets levetid. Dette uten at selve batterikostnaden er tatt i betrakning. Med en installasjonskostnad på 70,45 millioner Norske Kroner for batteriet, vil en løsning forespeilet i scenario 2 gi en god økonomisk gevinst.

Et annet aspekt ved installasjon av et slikt vanadium redoks flytbatteri, er om det lar seg gjøre i praksis. En batterikapasitet på 37,39 GWh er ekstremt mye. Et batteri i en slik størrelsesorden vil også kreve et enormt areal. Arealbruk vil ikke være et problem når det gjelder batterier on-site i vindparker, da den fysiske størrelsen ikke vil være en faktor for om en installasjon av et batteri i denne størrelsesordenen lar seg gjøre eller ikke. Den nødvendige kapasiteten på batteriet som antakelsene i scenario 2 krever er derimot en faktor. Med en batterikapasitet nærmere 48 ganger større en det største eksisterende batteriet i verden i dag, vil et tilfelle som i scenario 2, hvor all produksjon blir lagret når spotprisen er for lav, vil være umulig med dagens teknologi. Scenario 2 vil derfor fungere som et ønskescenario, som ville gitt en stor økonomisk fortjeneste om det hadde vært praktisk mulig å gjennomføre. Om noen av antakelsene endres, vil en kunne få en helt annen verdi på nødvendig batterikapasitet og økonomisk fortjeneste. I all hovedsak vil nye antakelser gå ut på å legge inn en begrensning på batterikapasiteten, basert på dagens batteristandarder. En slik endring vil føre til at batteriet slutter å lagre når en satt batterikapasitet er nådd, og nye beregninger vil kunne vise om det eventuelt vil kunne la seg gjøre, eller være økonomisk fornuftig å gjennomføre en slik installasjon.

5.6 Scenario 3 - Optimering

Scenario 3 baserer seg på samme problem som scenario 1, at flere vindparker er nødt til å strupe deler av produksjonen sin grunnet kapasiteten på kraftnettet. Det var i tillegg ønskelig å implementere delen fra scenario 2, hvor den lagrede produksjonen ikke selges dersom spotprisen er lavere enn en satt grense. Dette gjør scenario 3 til en kombinasjon av scenario 1 og scenario 2. Det ble derfor antatt en situasjon lik situasjonen i scenario 1, at Bessakerfjellet vindpark må strupe all produksjon over 30 MWh. Vindparken produserer derfor som vanlig, og lagrer all produksjon over 30 MWh i et vanadium redoks flytbatteri installert on-site i vindparken. Slik som i scenario 1 er det ønskelig å lade ut batteriet på tidspunkter hvor vindparkens totalproduksjon er lavere enn 30 MWh. I stedet for å gjøre som i scenario 1 og lade ut batteriet på hvert tidspunkt hvor utlading er mulig, implementeres scenario 2 slik den lagrede produksjonen kun selges dersom spotprisen er høyere enn en satt grense. Som beskrevet i kapittel 3.6 ble det tatt utgangspunkt i den gjennomsnittlige spotprisen i 2020 på 9,46 €/MWh, og for å optimalisere den økonomiske gevinsten ble den nedre grensen satt til 10 €/MWh. All produksjon over 30 MWh vil til en hver tid lagres i batteriet, og batteriet vil lades ut på tidspunkter hvor vindparkens totalproduksjon er lavere enn 30 MWh samtidig som at spotprisen er høyere enn 10 €/MWh.

Tabell 4.19 viser lagret produksjon og utlading av batteriet de første seks timene i 2020, og kan sees i sammenheng med tabell 4.2 og tabell 4.11. Tabellene viser henholdsvis Bessakerfjellet vindparks produksjon og spotprisen de første seks timene i 2020. Tabell 4.2 viser en overproduksjon de første tre timene, og tabell 4.19 viser at all produksjon over 30 MWh ble lagret i batteriet. Videre viser tabell 4.2 at det ble produsert mindre enn 30 MWh de neste tre timene.

Tabell 4.11 viser at spotprisen på tilsvarende tidspunkter var høyere enn 10 €/MWh, og tabell 4.19 viser hvor mye energi som ble ladet ut fra batteriet slik at salget til kraftnettet nådde 30 MWh.

I tabell 4.20 presenteres Bessakerfjellet vindparkens totale produksjon for fem timer midt i april. Tabellen viser at det i timene fra 19:00 til 21:00 ble produsert over 30 MWh slik at overproduksjonen skulle lagres. De to siste timene ble det produsert under 30 MWh slik at det var potensiale for utlading. Tabell 4.21 viser spotprisen for det samme tidsrommet som i tabell 4.20. Tabellen viser at spotprisen disse timene lå mellom 3,60 og 3,80 €/MWh. Det tilsier at selv om produksjonen de siste timene i tabell 4.20 viser potensiale for utlading, var spotprisen lavere enn den satte grensen på 10 €/MWh, og batteriet ble ikke ladet ut. I tabell 4.22 presenteres lagret og solgt produksjon i gjeldende tidsrom. Tabellen viser at produksjonen over 30 MWh ble lagret i timene hvor overproduksjon var tilfellet, og at det verken ble lagret eller utladet noe kraft de neste timene grunnet spotprisen presentert i tabell 4.21. Dette betyr at algoritmen, presentert i kapittel 3.6, og det simulerte batteriet fungerer som ønsket.

Som presentert i figur 4.3 i kapittel 4.1, og figur 4.4 i kapittel 4.2, har både vindstyrke og spotprisen i Norge en tendens til å være sesongbasert. Mindre vind i sommerhalvåret fører til mindre produksjon, og en lavere spotpris i samme tidsrom vil føre til at antakelsene i scenario 3 medfører perioder hvor batteriet verken lades opp eller lades ut. Tabell 4.24 viser noen timer med Bessakerfjellet vindparks totalproduksjon og spotpris noen timer i mai. Tabellen viser at det i alle disse timene ble produsert mindre enn 30 MWh, og at det var potensiale for utlading. Spotprisen i sammen tabell lå derimot under 10 €/MWh alle timene bortsett fra den siste timen. Dette synes godt i tabell 4.23, hvor verdien null står både i kolonnen for lagret produksjon og solgt produksjon. I den siste timen viser tabell 4.24 en lav totalproduksjon og en spotpris over grensen for å selge lagret energi. Tabell 4.23 viser at det var nok lagret energi i batteriet på dette tidspunktet til å lade ut tilsvarende mengde kraft som manglet for å nå 30 MWh i tilknytningspunktet.

Som beskrevet i kapittel 3.6 oppretter algoritmen til scenario 3 en matrise hvor batteriets oppdaterte energimengde lagres hver time. Tabell 4.25 viser et utsnitt fra matrisen noen timer i januar. Tabell 4.26 viser hvor mye energi som ble lagret i batteriet, og ladet ut fra batteriet i samme tidsrom. Tabellen viser at det i tidsrommet både ble produsert over 30 MWh, og at det på tidspunkter hvor det ikke ble produsert 30 MWh var en spotpris høyere enn 10 €/MWh. Tabell 4.25 sett i sammenheng med tabell 4.26 viser hvordan den lagrede produksjonsmengden i batteriet hele tiden økte i takt med den lagrede overproduksjonen, eller sank i takt med den utladede produksjonsmengden.

Algoritmen beskrevet i kapittel 3.6 plotter også den totale energimengden lagret i batteriet for hver time i 2020, slik som vist i figur 4.8. En sammenligning av grafen i figur 4.8 og grafen i figur 4.3, som viser en oversikt over vindstyrke i 2020, viser en tendens til at det ble lagret mest energi på vinteren og inn mot sommerhalvåret. Samtidig kommer det frem at batteriet ble tilført lav energimengde i sommerhalvåret, grunnet lite vind og lav produksjon. En sammenligning av spotprisen og mengden lagret energi i batteriet, vist i figur 4.8, viser at det på sommerhalvåret var lagret størst mengde energi i batteriet. Dette ble ikke ladet ut grunnet spotpris under 10 €/MWh. Tidspunkter på sommeren hvor figur 4.8 viser utladinger fra batteriet, kan en se fra grafen i figur 4.4 at var på tidspunkter hvor spotprisen skjøyt i været og var over grensen for å avvente utladingen. Som nevnt i kapittel 2.5.2 kan en regne med at et vanadium redoks flytbatteri

er estimert å tåle 12000 – 14000 sykluser i løpet av sin levetid, tilsvarende 600 – 700 i året med en levetid på 20 år. Ut ifra plottet i figur 4.8 var antall sykluser i 2020 innenfor denne grensen.

Den høyeste toppen i plottet vist i figur 4.8, vil være den største energimengden lagret i batteriet på ett tidspunkt i 2020. Det ble antatt at denne verdien vil være representativ for hvor stor kapasitet et installert vanadium redoks flytbatteri vil måtte ha, etter antakelsene tilhørende scenario 3. I kapittel 3.6 er det beskrevet hvordan denne verdien ble funnet, og resultatet er presentert i tabell 4.27. Tabellen viser at nødvendig kapasitet på et slikt batteri vil være 14,18 GWh. Et batteri i denne størrelsesordenen er flere ganger større enn det største batteriet som eksisterer i dag. I kapittel 2.5.2 beskrives det største vanadium redoks batteriet som finnes i dag, med en installert kapasitet på 800 MWh. Nødvendig kapasitet på batteriet i scenario 3 vil være nesten 18 ganger større enn det største batteriet som finnes i dag. Dette er en enormt stor forskjell, og selv om det er teoretisk mulig, er det ikke mulig med dagens batteristandarder.

I tabell 4.28 presenteres den økonomiske gevinsten ved å installere et slikt vanadium redoks flytbatteri i Bessakerfjellet vindpark, med antakelsene gjeldene for scenario 3. Tabellen viser den økonomiske fortjenesten ut ifra hvor mye som ble utladet fra batteriet, sammen med den gjeldende spotprisen for disse tidspunktene i 2020. Fortjenesten vist i tabellen er dermed i forhold til vindparkens fortjeneste ut ifra spotprisen 2020 sammen med antakelsen om at all produksjon over 30 MWh måtte strupes og ikke ble solgt. Fortjenesten i 2020 var 6,84 millioner Norske Kroner. Det ble antatt at den årlige fortjenesten vil være gjeldende ut batteriets levetid, slik at det er mulig å undersøke om det vil være lønnsomt å installere et slikt batteri i vindparken eller ikke.

For å undersøke om en installasjon av et slik batteri vil være lønnsom, må en ta den årlige fortjenesten i betraktning sammen med batteriets levetid, og se det opp mot kostnaden ved en installasjon av et vanadium redoks flytbatteri i denne størrelsesordenen. I kapittel 2.5.2 vist i figur 2.11, er det vist at prisen for vanadium redoks flytbatterier i 2017 var 0,2 USD pr. kWh. Ut ifra antakelsene gjeldende for scenario 3, vil det medføre en installasjonskostnad på 2,84 millioner USD. I kapittel 3.3 beskrives antakelsen om at gjennomsnittlig valutakurs mellom NOK og USD i 2020 skal benyttes for beregninger for fremtiden, og det medfører en batterikostnad på 26,64 millioner Norske Kroner. Vanadium redoks flytbatterier ble antatt å ha en levetid på 20 år. Med en årlig fortjeneste på 6,84 millioner Norske Kroner gir det en total fortjeneste på 136,8 millioner Norske Kroner. Med en installasjonskostnad på 26,64 millioner Norske Kroner tilsier analysen at det rent økonomisk vil være gunstig å installere et slikt batteri i Bessakerfjellet vindpark. Likevel vil batteriet måtte være nesten 18 ganger større enn det største batteriet som finnes i dag. Det er derfor ikke mulig med dagens batteristandarder å få til et scenario med like antakelser som i scenario 3. Det vil være mulig å gjøre endringer i algoritmen, og sette et tak på batterikapasiteten etter dagens standard. Det vil måtte gjøres nye analyser for å undersøke om et slikt batteri vil kunne gi en økonomisk gevinst.

5.7 Fremtidig utvikling

I kapittel 2.5.2 er flere av dagens batteristandarder presentert. I dag forventes det at et vanadium redoks flytbatteri skal ha en levetid på 20 år, og at det tåler 12000 – 14000 utladingssykluser i løpet av denne levetiden. I kapitlet beskrives også vanadium redoks flytbatteriet som har den største installerte kapasiteten i dag, på 800 MWh. I figur 2.11 i samme kapittel presenteres en graf over LCOE-kostnadene til et installert vanadium redoks flytbatteri, som i 2017 lå på 0,2 USD/kWh installert kapasitet.

I takt med verdens økende energibehov, beskrevet i kapittel 2.4, øker også behovet for energilagring. Kapasiteten til et vanadium redoks flytbatteri har ingen teoretisk begrensning, og er derav en energilagringsteknologi som det stadig forskes mere på. Begrensningene rundt vanadium redoks flytbatterier i dag baserer seg på arealbruk, pris og teknologi for å i praksis gjøre det mulig å konstruere nødvendig fysisk størrelse på elektrolyttankene og cellestacken. Med det økende behovet for energilagring sammen med den økende mengden forskning på vanadium redoks flytbatterier, er det sannsynlig at en positiv utvikling vil komme som følger av dette. Med positiv utvikling menes utvikling av teknologi på en slik måte at det i praksis vil være mulig å bygge fysisk større batterier, samtidig som at LCOE-kostnadene for slike batterier vil reduseres per kWh installert kapasitet. Med en slik utviklingstrend i teknologien vil det også være tenkelig at levetiden og antall sykluser vil kunne forbedres de kommende årene.

5.8 Videre arbeid

Problemstillingen i oppgaven åpnet opp for flere angrepsvinkler, hvor gruppen valgte en tilnærming som ville se på batteriet som et ideelt batteri med uendelig kapasitet. Ved å se på problemstillingen på en annen måte vil det være mulig å oppnå et fysisk og teoretisk resultat som ikke bare er gunstig, men også realistisk med tanke på dagens forskning på vanadium redoks flytbatterier. Ved å legge inn et tak på batterikapasiteten i MATLAB-algoritmen ville det vært mulig å kun lagre overskuddsenergi når det er tilgjengelig plass i batteriet. Ved å eksempelvis sette en begrensning på kapasiteten til batteriet på 200 MWh, vil det medføre at mindre grad av overskuddsenergien lagres. På bakgrunn av at struping er et reelt problem i dagens vindparker, ville også dette skapt en situasjon hvor vindparken fjerner noe av denne problematikken. Denne situasjonen vil kunne skape et noe mer realistisk bilde av det installerte vanadium redoks flytbatteriet. Det vil måtte gjøres nye beregninger og simuleringer for å undersøke om en slik løsning vil være økonomisk gunstig.

Forskning på vanadium redoks flytbatterier er noe det satses stort på. I kapittel 2.5.2 skrives det om en batterifabrikk i Kina som har produsert et vanadium redoks flytbatteri på hele 800 MWh. Dette er en nyskaping innen batteriteknologi, og er bare begynnelsen på utviklingen av høykapasitets batterier som kan fungere utmerket on-site i vindparker. Utviklingen av vanadium redoks flytbatterier baner vei for energilagringssystemer som i fremtiden vil gi løsninger på lagring av overskuddskraft fra vindparker og andre fornybare produksjonskilder. I fremtiden er det fullt mulig at lagring av overskuddskraft i stor skala, slik som i scenario 1, vil kunne bli en realitet. Dette er avhengig av økt forskning på området og billigere materialer.

Et annet aspekt ved energilagring on-site i vindparker er at dette skaper jevn flyt mellom produserende enhet og forbruker. Ved å se på frekvensproblemer og spenningsforstyrrelser ved produksjon av vindenergi med og uten batterilagring, vil oppgaven få en større og bredere teknisk standard.

Opgaven ser primært på den elkrafttekniske biten av energilagring. En analyse av vanadium redoks flytbatteriets kjemiske egenskaper er et aspekt som ikke kommer tydelig frem i denne oppgaven. Dette er et tema oppgaven kunne bygget videre på for å få en flerfaglig struktur og dypere forståelse av denne type batteriteknologi.

5.9 Feilkilder

Potensielle feilkilder som kunne oppstått under denne oppgaven må tas under etterretning og forsøkt utledet tidligst mulig i prosessen. Menneskelige feil er den grunnen som nesten alltid har

størst innvirkning på store prosjekter. En avlesningsfeil kan utgjøre en forskjell tidlig i rapporten, som vil forplante seg videre. Denne rapporten gjør nesten utelukkende alle beregninger og simuleringer i MATLAB, og resultatene vil ikke påvirkes av avlesningsfeil.

Datafilene som ble sendt over fra Trønderenergi kan potensielt inneholde mangler, som videre forplanter seg og skaper unøyaktige resultater i oppgaven. Da datafilene inneholder store mengder data og verdier, kan noen av tallene forsvinne i filopplastingen. Gruppen har brukt så mange verdier i denne analysen at noen tilfeller av datafeil ikke er avgjørende for resultatene, og dette kan dermed neglisjeres.

Algoritmene i MATLAB kan potensielt være utledet på en slik måte at verken gruppens medlemmer eller veileder oppfattet mangler som kunne påvirket resultatene. I denne oppgaven er de ulike algoritmene sikkerhetsjekkert flere ganger for å minske denne risikoen.

6 Konklusjon

Når det skal konkluderes om vanadium redoks flytbatteri er lønnsomt som energilagringssystem on-site i vindparker, er det flere aspekter som må tas i betraktning. En konklusjon vil bli trukket tilhørende hvert av de tre scenarioene, før det basert på dette vil bli trukket en overordnet konklusjon på problemstillingen.

Scenario 1, som utelukkende tar for seg lagring av overskuddsproduksjon, er det scenarioet hvor behovet for batterikapasitet er minst. Samsvarende med dette krever scenario 1 de laveste kostnadene rundt en installasjon av et vanadium redoks flytbatteri. Et installert vanadium redoks flytbatteri ville gitt en ekstra inntjening på 101,4 millioner NOK i løpet av sin levetid, mens selve batteriet ville kostet 13,46 millioner NOK. Den nødvendige kapasiteten på batteriet ble beregnet til å være 7,15 GWh, nesten 9 ganger så stort som det største batteriet som finnes i dag. Det konkluderes derav med at scenario 1 vil være økonomisk gunstig, men at det ikke er mulig å gjennomføre med dagens batteristandarder.

Scenario 2 baserer seg utelukkende på lagring og salg av produksjon ut ifra spotpris. Dette medfører at scenario 2 har størst behov for installert kapasitet, og med det også størst installasjonskostnad. Batteriet ville kostet 70,4 millioner NOK å installere, men det ble beregnet at det ville gi en total fortjeneste på 289 millioner NOK i løpet av den estimerte levetiden. Den nødvendige kapasiteten på batteriet ble beregnet til å være 37,39 GWh, nesten 48 ganger så stort som det største installerte batteriet i dag. Konklusjonen blir derfor tilsvarende som for scenario 1.

Scenario 3 er utviklet som en hybrid mellom scenario 1 og scenario 2, og pris på batteriinstallasjon og nødvendig kapasitet ble også liggende mellom de to foregående scenarioene. Den nødvendige kapasiteten ville måtte være 14,18 GWh, nesten 18 ganger større enn det største installerte batteriet i verden i dag. Prisen for batteriet ble beregnet til å være 26,64 millioner NOK, og i løpet av sin levetid ville batteriet gi en økonomisk fortjeneste på 136,8 millioner NOK. Konklusjonen for scenario 3 blir derfor tilsvarende scenario 1 og scenario 2.

Alle tre scenarioene viser seg å være økonomisk gunstige, men vanskelige å gjennomføre med dagens batteristandarder. Av de tre scenarioene vil scenario 2 være det mest urealistiske, da den nødvendige kapasiteten er mange ganger større enn for de andre to scenarioene. Det konkluderes derfor med at scenario 2 er et ønske-scenario, men med veldig liten sannsynlig for at det blir en realitet. Scenario 1 vil være det mest realistisk scenarioet å få til, da det både krever minst batterikapasitet og har lavest kostnad for installasjon. I tillegg tar scenario 1 for seg problemet rundt struping av produksjon, et reelt problem for mange vindparker i dag. Implementeringen av spotpris i scenario 3 vil være ønskelig å få til sammen med scenario 1, da beregningene har vist at dette vil gi en større økonomisk gevinst. En slik løsning vil derimot kreve en større batterikapasitet, slik at scenario 1 vil være mest sannsynlig å la seg gjøre først.

På spørsmålet om et vanadium redoks flytbatteri er lønnsomt i vindparker konkluderes det med at dette vil være lønnsomt. Analysen er utarbeidet som en teknisk-økonomisk case-analyse, slik at den kan benyttes i flere vindparker med andre forutsetninger. Når det gjelder spørsmålet om det er praktisk mulig å utføre en installasjon av et slikt batteri, konkluderes det med at det er teoretisk mulig å gjennomføre, men at det ikke er mulig med dagens batteriteknologi. Vanadium redoks flytbatterier forskes stadig mer på, og gruppen konkluderer med at dette kan bli en mulig løsning i fremtiden.

Referanser

- [1] Microsoft. *Programvare for Microsoft Excel-regneark | Microsoft 365*. URL: <https://www.microsoft.com/nb-no/microsoft-365/excel> (sjekket 11.05.2021).
- [2] MATLAB. *MATLAB - MathWorks*. URL: <https://se.mathworks.com/products/matlab.html> (sjekket 11.05.2021).
- [3] LaTeX. *LaTeX - A document preparation system*. URL: <https://www.latex-project.org/> (sjekket 11.05.2021).
- [4] Zotero. *Zotero | Your personal research assistant*. URL: <https://www.zotero.org/> (sjekket 11.05.2021).
- [5] Brackets. *A modern, open source code editor that understands web design*. Brackets. URL: <http://brackets.io> (sjekket 11.05.2021).
- [6] Statkraft. *Vindkraft | Statkraft*. URL: <https://www.statkraft.com/var-virksomhet/vindkraft/> (sjekket 09.04.2021).
- [7] Knut Hofstad. *vindkraftverk*. I: *Store norske leksikon*. 29. nov. 2019. URL: <http://snl.no/vindkraftverk> (sjekket 09.04.2021).
- [8] Wind Europe. *Wind Power Numbers | WindEurope*. URL: <https://windeurope.org/about-wind/daily-wind/banners/share-of-wind.gif?date=2021-04-09&time=1508> (sjekket 09.04.2021).
- [9] Olav A. Øvrebø. *Produksjonen av vindkraft opp 79 prosent i 2020*. Energi og Klima. 4. feb. 2021. URL: <https://energiogklima.no/nyhet/datakilder/status-for-vindkraft-i-norge/> (sjekket 09.04.2021).
- [10] NVE. *7,1 TWh kraftproduksjon ble satt i drift i 2020 - NVE*. URL: <https://www.nve.no/nytt-fra-nve/nyheter-energi/7-1-twh-kraftproduksjon-ble-satt-i-drift-i-2020/> (sjekket 09.04.2021).
- [11] NVE. *Vindkraftdata - NVE*. URL: <https://www.nve.no/energiforsyning/kraftproduksjon/vindkraft/vindkraftdata/> (sjekket 09.04.2021).
- [12] Trønderenergi. *Bessakerfjellet vindpark*. tronderenergi.no. URL: <http://tronderenergi.no/produksjon/kraftverk/bessakerfjellet> (sjekket 12.04.2021).
- [13] NVE. *Konsesjonssak - NVE*. URL: <https://www.nve.no/konsesjonssaker/konsesjonssak?type=A-6&id=22> (sjekket 12.04.2021).
- [14] Olje og energidepartementet. *Kraftmarkedet*. Energifakta Norge. URL: <https://energifaktanorge.no/norsk-energiforsyning/kraftmarkedet/> (sjekket 23.02.2021).
- [15] Knut A. Rosvold. *kraftselskap*. I: *Store norske leksikon*. 13. jan. 2020. URL: <http://snl.no/kraftselskap> (sjekket 24.02.2021).
- [16] NTE. *Hvordan fungerer strømmarkedet?* nte.no. URL: <https://nte.no/blogg/innlegg/slik-fungerer-stromarkedet> (sjekket 18.02.2021).
- [17] Norges Bank. *Gjennomsnittlig Norges Banks (NB) valutakurser - 2020 | valuta-kurser.no*. URL: <https://www.valuta-kurser.no/norges-banks-m%C3%A5nedlige-gjennomsnittlige-2020-valutakurser> (sjekket 26.04.2021).
- [18] enerWE. *Slik kjøpes og selges den norske strømmen på kraftbørsen*. Section: nyheter. 11. okt. 2018. URL: <https://enerwe.no/slik-kjopes-og-selges-den-norske-strommen-pa-kraftborsen/162936> (sjekket 24.02.2021).
- [19] NVE. *Områdekonsesjon - NVE*. URL: <https://www.nve.no/konsesjonssaker/konsesjonsbehandling-av-nettanlegg/omradekonsesjon/?ref=mainmenu> (sjekket 28.02.2021).
- [20] Statnett. *Reservemarkeder*. Statnett. URL: <https://www.statnett.no/for-aktorer-i-kraftbransjen/systemansvaret/kraftmarkedet/reservemarkeder/> (sjekket 07.04.2021).

- [21] Statnett. *Primærreserver - FCR*. Statnett. URL: <https://www.statnett.no/for-aktorer-i-kraftbransjen/systemansvaret/kraftmarkedet/reservemarkeder/primarreserver/> (sjekket 07.04.2021).
- [22] Statnett. *aFRR - sekundærreserve*. Statnett. URL: <https://www.statnett.no/for-aktorer-i-kraftbransjen/systemansvaret/kraftmarkedet/reservemarkeder/sekundarreserver/> (sjekket 07.04.2021).
- [23] Statnett. *Tertiærreserver - mFRR*. Statnett. URL: <https://www.statnett.no/for-aktorer-i-kraftbransjen/systemansvaret/kraftmarkedet/reservemarkeder/tertiarreserver/> (sjekket 07.04.2021).
- [24] Olje og energidepartementet. *Elsertifikater*. Energifakta Norge. URL: <https://energifaktanorge.no/regulering-av-energisektoren/elsertifikater/> (sjekket 08.04.2021).
- [25] NHO. *Energi og klima*. URL: <https://www.nho.no/publikasjoner/p/naringslivets-perspektivmelding/energi-og-klima/> (sjekket 13.04.2021).
- [26] IEA. *About IEA*. IEA. URL: <https://www.iea.org/about> (sjekket 13.04.2021).
- [27] IEA. *IEA – International Energy Agency*. IEA. URL: <https://www.iea.org> (sjekket 14.04.2021).
- [28] Olav A. Øvrebø. *Verdens avhengighet av fossil energi – Klimavakten*. Energi og Klima. URL: <https://energiogklima.no/klimavakten/fossilavhengigheten/> (sjekket 16.04.2021).
- [29] Håvard Karoliussen. *TFNE3007-Forbybar Energi Valgfag-Energilagring-Notat 12*. 24. feb. 2021.
- [30] Alejandro Clemente. *Redox flow batteries: A literature review oriented to automatic control*. 14. apr. 2021.
- [31] Odne Stokke Burheim. “Chapter 7 - Secondary Batteries”. I: *Engineering Energy Storage*. Elsevier Inc, 2017, s. 111–145. ISBN: 978-0-12-814101-4.
- [32] VSUN Energy. *Technical Info*. VSUN Energy. URL: <https://vsunenergy.com.au/technical-info/> (sjekket 12.04.2021).
- [33] Vanadium Corp. *Where now for the world’s largest energy storage battery in China?* VanadiumCorp Resource Inc. URL: <https://www.vanadiumcorp.com/news/industry/where-now-for-the-worlds-largest-energy-storage-battery-in-china/> (sjekket 07.05.2021).
- [34] Marino G. Pieterse. *Strategic Metals and Rare Earths Letter*. 10. mai 2021.
- [35] Mark Wilson. “Lazard’s Levelized Cost of Storage Analysis—Version 4.0”. I: (), s. 60.
- [36] CFI. *Levelized Cost of Energy (LCOE) - Overview, How To Calculate*. Corporate Finance Institute. URL: <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/knowledge/finance/levelized-cost-of-energy-lcoe/> (sjekket 12.05.2021).
- [37] UIB. *5.3 Levelized Cost of Energy / Electricity (LCOE): Energy Primer*. URL: <https://mitt.uib.no/courses/4050/pages/5-dot-3-levelized-cost-of-energy-slash-electricity-lcoe> (sjekket 12.05.2021).

A Algoritme for plot av Bessakerfjellet vindparks 25 turbiner

```
1
2 clc
3 format long
4
5 plot(produksjonsdataaendelig{:,2}) %Plotter turbin 1
6
7 xlabel('Timer') %Tittel x-aksen
8 ylabel('kWh') %Tittel y-aksen
9 axis([0 24 0 2400]) %Definerer aksene
10 hold on %Plotter videre i samme koordinatsystem
11 plot(produksjonsdataaendelig{:,3}) %Plotter turbin 2
12 hold on
13 plot(produksjonsdataaendelig{:,4}) %Plotter turbin 3
14 hold on
15 plot(produksjonsdataaendelig{:,5}) %Plotter turbin 4
16 hold on
17 plot(produksjonsdataaendelig{:,6}) %Plotter turbin 5
18 hold on
19 plot(produksjonsdataaendelig{:,7}) %Plotter turbin 6
20 hold on
21 plot(produksjonsdataaendelig{:,8}) %Plotter turbin 7
22 hold on
23 plot(produksjonsdataaendelig{:,9}) %Plotter turbin 8
24 hold on
25 plot(produksjonsdataaendelig{:,10}) %Plotter turbin 9
26 hold on
27 plot(produksjonsdataaendelig{:,11}) %Plotter turbin 10
28 hold on
29 plot(produksjonsdataaendelig{:,12}) %Plotter turbin 11
30 hold on
31 plot(produksjonsdataaendelig{:,13}) %Plotter turbin 12
32 hold on
33 plot(produksjonsdataaendelig{:,14}) %Plotter turbin 13
34 hold on
35 plot(produksjonsdataaendelig{:,15}) %Plotter turbin 14
36 hold on
37 plot(produksjonsdataaendelig{:,16}) %Plotter turbin 15
38 hold on
39 plot(produksjonsdataaendelig{:,17}) %Plotter turbin 16
40 hold on
41 plot(produksjonsdataaendelig{:,18}) %Plotter turbin 17
42 hold on
43 plot(produksjonsdataaendelig{:,19}) %Plotter turbin 18
44 hold on
45 plot(produksjonsdataaendelig{:,20}) %Plotter turbin 19
46 hold on
47 plot(produksjonsdataaendelig{:,21}) %Plotter turbin 20
48 hold on
49 plot(produksjonsdataaendelig{:,22}) %Plotter turbin 21
50 hold on
51 plot(produksjonsdataaendelig{:,23}) %Plotter turbin 22
52 hold on
53 plot(produksjonsdataaendelig{:,24}) %Plotter turbin 23
54 hold on
```

```
55 plot(produksjonsdataendelig{:,25}) %Plotter turbin 24
56 hold on
57 plot(produksjonsdataendelig{:,26}) %Plotter turbin 25
58 grid
59
60 save('produksjonsdataendelig') %Lagre workspace
```

B Algoritme for plot av parkens månedlige produksjon

```
1
2 clc
3 format long
4
5 plot(produksjonsdataendelig{:,28}) %Plotter parkens produksjon hver maaned
6
7 xlabel('Maaned')
8 ylabel('kwh')
9 axis([1 12 0 (3.5*10^7)])
10 grid
11 %Definerer aksene
12
13
14 save('produksjonsdataendelig') %lagre workspace
```


C Algoritme for plot av vindstyrke

```
1
2 clc
3 format long
4
5 figure (1)
6 bar(vindstyrke.Snitthvermaaned(1:12)) % Plotter vindstyrken hver maaned
7
8 bar(vindstyrke.Snitthvermaaned,0.7)
9 xlabel ('Maaneder')
10 ylabel ('m/s')
11 axis ([1 12 0 15])
12 grid
```

D Algoritme for plot av spotpris

```
1
2 clc
3 format long
4
5 figure (1)
6 plot(spotprismaaned3{:,3}) % Plotter timesverdiene hver time
7
8 xlabel ('Timer')
9 ylabel ('Euro/MWh')
10 axis ([0 8785 0 (60)])
11 grid
12
13
14 figure (2)
15 bar(spotprismaaned3{:,5}) % Plotter timesverdiene hver maaned
16
17 xlabel ('Maaneder')
18 ylabel ('Euro/MWh')
19 axis ([1 12 0 (25)])
20 grid
```

E Algoritme Scenario 1

```

1  clc
2  format long
3  A=[]; %Lager enn tom matrise 'A'
4  for i = 1:8760
5  %Lokke som gaar igjennom alle radene av data
6      if(produksjonsdataendelig{i,27} > 30000)
7          %Sjekker om produksjonsdataen er over 30000 for alle rader
8              fprintf('%d\n',i+1);
9              %Printer de gjeldende radene
10             A(i,1) = produksjonsdataendelig{i,27}-30000;
11             %Skriver inn overproduksjon i A1
12         end
13         if(produksjonsdataendelig{i,27} < 30000)
14             %Sjekker om produksjonsdata er under 30000 for alle rader
15             fprintf('%d\n',i+1);
16             A(i,1) = 0;
17             %Skriver 0 i A1
18         end
19     end
20     Test=[]; %Lager en tom matrise 'Test'
21     ekstra_energi = 0; %Variabelen representerer batteriet
22
23     for i = 1:8760
24         ekstra_energi = ekstra_energi + A(i,1);
25         %Setter batteriet lik seg selv pluss ny tillagt verdi
26         if (A(i,1)==0) %Utfører om A1 = 0
27             x = 30000 - produksjonsdataendelig{i,27};
28             %x = Det som gjenstaar for aa naa produksjon paa 30000
29             if(ekstra_energi == 0) %Utfører om batteriet er tomt
30                 A(i,2) = 0; %Skriver 0 i A2
31             end
32             if(ekstra_energi < x)
33                 %Utfører om verdien i batteriet er mindre enn x
34                 A(i,2) = ekstra_energi; %Lader ut hele batteriet
35                 ekstra_energi = 0; %Setter batteriet lik 0
36             end
37             if (ekstra_energi > x)
38                 %Utfører om verdien i batteriet er større enn x
39                 A(i,2)= x; %Lader ut x
40                 ekstra_energi = ekstra_energi - x;
41                 %Trekker utladet verdi fra batteriets verdi
42             end
43         end
44         Test{i,1}=ekstra_energi; %Skriver batteriets verdi inn i 'Test'
45     end
46     filename = 'storre.xlsx';
47     xlswrite(filename,A) %Skriv 'A' inn i en Excel-fil
48
49     plot(Testplot{:,2}) %Plotter verdien fra 'Test'
50     xlabel('Timer')
51     ylabel('kwh')
52     axis ([0 8760 0 (8*10^6)])
53     grid

```

F Algoritme Scenario 2

```
1 clc
2 format long
3 B=[]; %Lager en tom matrise 'B'
4 for i = 1:8760
5 %Sjekker alle verdiene for spotpris
6     if(spotprisendelig{i,3} < 15) %Sjekker om spotpris er under 15
7         fprintf('%d\n',i+1); %Printer de gjeldende radene
8         B(i,1) = produksjonsdataendelig{i,27};
9         %Lagrer produksjon i B1
10        end
11
12        if(spotprisendelig{i,3} > 15) %Sjekker om spotpris er over 15
13            fprintf('%d\n',i+1);
14            B(i,1) = 0; %Selger produksjon som vanlig
15        end
16    end
17
18    spotplot=[]; %Lager en tom matrise 'spotplot'
19    ekstra_energi2 =0;
20    %Variabelen representerer batteriet
21
22    for i = 1:8760
23    %Sjekker verdien for alle timene
24        ekstra_energi2 = ekstra_energi2 + B(i,1);
25        %Batteriet settes lik seg selv pluss forrige lagrede verdi
26        if(B(i,1)==0)
27            %Utfores om batteriet ikke tilfores produksjon
28            if(ekstra_energi2 == 0) %Sjekker om batteriet er tomt
29                B(i,2)=0; %Lader ikke ut batteriet
30            end
31
32            if(spotprisendelig{i,3} > 15) %Sjekker om spotpris er over 15
33                B(i,2) = produksjonsdataendelig{i,27} + ekstra_energi2;
34                %Produsert kraft + lagret energi selges
35                ekstra_energi2 = 0; %Batteriet er utladet
36            end
37        end
38        spotplot{i,1}=ekstra_energi2;
39        %Skriver batteriets verdi i 'spotplot'
40    end
41
42    filename = 'spot.xlsx';
43    xlswrite(filename,B) %Skriver 'B' i en Excel-fil
44
45    plot(spotplot15{:,2}) %Plotter verdiene fra 'spotplot'
46    xlabel('Timer')
47    ylabel('kWh')
48    axis ([0 8760 0 (4*10^7)])
49    grid
```

G Algoritme Scenario 3

```

1  clc
2  format long
3  C=[]; %Lager en tom matrise 'C'
4
5  for i = 1:8760
6  %Gaar igjennom produksjonsdata for hver time
7      if(produksjonsdataendelig{i,27} > 30000)
8          %Skjer om det er produsert over 30000
9              fprintf('%d\n',i+1); %Printer de gjeldende radene
10             C(i,1) = produksjonsdataendelig{i,27}-30000;
11             %Skriver overproduksjon i C1
12         end
13         if(produksjonsdataendelig{i,27} < 30000)
14             %Skjer om det er produsert under 30000
15                 fprintf('%d\n',i+1);
16                 C(i,1) = 0; %Batteriet lades ikke opp
17             end
18         end
19
20     D=[]; %Lager tom matrise 'D'
21     ekstra_energi3 = 0;
22     %Variabelen representerer batteriet
23
24     for i = 1:8760
25     %Gaar igjennom data for hver time
26         ekstra_energi3 = ekstra_energi3 + C(i,1);
27         %Batteriet settes lik seg selv + sist lagrede verdi
28         if (C(i,1)==0)
29             %Skjer om batteriet ikke lades opp
30                 y = 30000 - produksjonsdataendelig{i,27};
31                 %y = Det som gjenstaar for aa naa produksjon paa 30000
32                 if(ekstra_energi3 == 0) %Skjer hvis batteriet er tomt
33                     C(i,2) = 0; %Batteriet lader ikke ut
34                 end
35                 if(spotprisendelig{i,3} < 10)
36                     %Sjekker om spotpris er under 10
37                         C(i,2)=0; %Lader ikke ut batteriet
38                 end
39                 if(spotprisendelig{i,3} > 10)
40                     %Sjekker om spotpris er over 10
41                         if(ekstra_energi3 < y)
42                             %Utfører om verdien i batteriet er mindre enn y
43                                 C(i,2) = ekstra_energi3; %Lader ut batteriet
44                                 ekstra_energi3 = 0; %Batteriet er utladet
45                         end
46                         if (ekstra_energi3 > y)
47                             %Utfører om verdien i batteriet er større enn y
48                                 C(i,2)= y; %Lader ut y
49                                 ekstra_energi3 = ekstra_energi3 - y;
50                                 %Trekker utladet verdi fra batteriets verdi
51                         end
52                     end
53                 end
54                 D{i,1}=ekstra_energi3;

```

```
55     %Skriver batteriets verdi inn i 'D'
56 end
57
58 filename = 'scen3.xlsx';
59 xlswrite(filename,C)           %Skriv 'C' inn i en Excel-fil
60
61
62 plot(D10plot{:,2})           %Plotter verdien fra 'D'
63 xlabel('Timer')
64 ylabel('kWh')
65 axis ([0 8760 0 (2*10^7)])
66 grid
```

