

BACHELOROPPGAVE

BO19E-53

Lading av elektriske fly

Anna Svarstad
Harald Børnes
Ramona Mork
Audun Eivindson Hellem

31. mai 2019



Dokumentkontroll

<i>Rapportens tittel:</i> Lading av elektriske fly	<i>Dato</i> 31. mai 2019
	<i>Rapportnummer:</i> B019E-53
<i>Forfatter(e):</i> Harald Børnes Anna Svarstad Audun Eivindson Hellem Ramona Mork	<i>Studieretning:</i> ELK16
	<i>Antall sider m/vedlegg</i> 116
<i>Høgskolens veileder:</i> Lasse Hugo Sivertsen	<i>Gradering:</i> Åpen
<i>Eventuelle merknader:</i> Vi tillater at oppgaven kan publiseres.	

<i>Oppdragsgiver:</i> Avinor	<i>Oppdragsgivers referanse:</i> Olav Mosvold Larsen
<i>Oppdragsgivers kontaktperson(er) (inkludert kontaktinformasjon):</i> Olav Mosvold Larsen (olav.mosvold.larsen@avinor.no) Erik By (erik.by@avinor.no)	

Forord

Ideen bak dette bachelorprosjektet ble inspirert av en spennende artikkel om elektrifisering av fly, publisert i Teknisk Ukeblad høsten 2017 [40]. Det å kunne bidra positivt til en så stor industri ga oss stor motivasjonen, og kort tid etter sendte vi en e-post til Avinor for å kartlegge muligheten for å skrive en oppgave om dette temaet. Etter mye frem og tilbake fikk vi beskjed om at dette var noe de gjerne ønsket å få til.

Vi har gjennom hele prosessen støtt på problemer som har vært frustrerende, men med god hjelp fra veiledere og samarbeidspartnere har vi klart å løse dette effektivt. I den forbindelse ønsker vi å takke vår oppdragsgiver, Avinor, som har fulgt oss opp tett og veiledet oss når vi har møtt på utfordringer. BKK, Sogn og Fjordane Energi (SFE), Sognekraft og Sunnfjord Energi fortjener også vår takknemlighet for deres bidrag til grunnlaget for beregningene i rapporten.

Til slutt vil vi gi en stor takk til vår veileder Lasse Hugo Sivertsen som har vært til stor hjelp og støtte gjennom hele prosessen.

Sammendrag

Denne oppgaven ser på muligheten for å få til lading av elfly, enten fullelektriske eller elektrifiserte, på lufthavnene Bergen (Flesland), Førde (Bringeland), Florø, Sogndal (Haukåsen) og Sandane (Anda). Dette er gjort med bakgrunn i Avinor sin visjon om å få til elektrifisert inneriksluftfart innen 2040 [9].

Der man i resten av Europa kan benytte seg av hurtigtog og motorveier til lands, må man i Norge ta omveier rundt fjell og fjorder for å nå destinasjonen. Det har derfor blitt bygget ut mange mindre flyplasser i distriktene, kjent som kortbanenettet. Flyrutene som går mellom disse flyplassene kalles FOT-ruter¹, og subsidieres av staten. Denne subsidieringen gjøres fordi trafikken til og fra disse lufthavnene er såpass lav, og derfor er det ikke økonomisk lønnsomt i seg selv for flyselskapene å drifte disse rutene.

Den kuperten topografien og det utbygde kortbanenettet gjør Norge spesielt godt egnet for elektriske fly, da flyplassene ligger relativt nærme hverandre i luftlinje. Tilgangen på billig strøm, i tillegg til stort politisk engasjement for å innføre miljøvennlige løsninger, er også viktige bidragsfaktorer.

Elfly har i dag relativt kort rekkevidde grunnet begrensninger i batteriteknologien, og de første elflyene som blir klare for kommersiell persontransport vil derfor trolig ha en kabinkapasitet² på under 19.

Beregningene i denne oppgaven viser at det teoretisk sett skal være mulig å realisere lading av elektriske fly på Vestlandet. De fleste flyplassene vil trenge en batteribank som blir ladet jevnt opp i løpet av døgnet, for å redusere effektpeakene på strømmettet når elfly skal lades på kort tid. Mye av teknologien for å få til lading av elfly finnes allerede i dag, blant annet til lading av elektriske ferjer. Slike effektoverføringer med bruk av batteribanker er derfor mulig å gjennomføre.

¹ Forklart i ordforklaringer

² Forklart i ordforklaringer

De største hindringene i dag ligger i batteriteknologien, og å få elektrifiserte fly i produksjon. Man må også styrke nettet ved flyplassene eller installere batteribanker for å kunne levere ønsket ladeeffekt, i hvert fall på sikt når flere ruter elektrifiseres. Flyprodusentene er veldig forsiktig med å gi konkrete tekniske data på flyene de holder på å utvikle, noe som har medført at det i denne oppgaven er tatt en del forutsetninger. Det understrekes derfor at løsninger og konklusjoner i denne oppgaven må anses som forslag.

Innhold

Dokumentkontroll	i
Forord	ii
Sammendrag	iii
1 Innledning	1
1.1 Organisering av rapport	1
1.2 Oppdragsgiver og samarbeidspartnere	2
1.3 Problemstilling	3
1.4 Hovedidé for løsningsforslag	4
1.5 Begrunnelse	5
2 Kravspesifikasjon	6
3 Forutsetninger	7
3.1 Generelle forutsetninger	7
3.2 Forutsetninger for beregningene	8
4 Teori	12
4.1 Batteriteknologi	12
4.1.1 C-rating	12
4.1.2 Nyere batteriteknologi	13
4.1.3 Batterier i fly	16
4.1.4 Rekkeviddeforlenging	17
4.2 Batteribanker	19
4.2.1 Hvilke typer er aktuelle?	20
4.2.2 Backup	21
4.3 Flytyper	22
4.3.1 Oversikt over kommende fly	22
4.3.2 Økende flyavganger	27
4.4 Flyplasser	28
4.5 Rutelogistikk og ladetid	30
4.5.1 "Hub-and-spoke"-modellen	30
4.6 Situasjonen per 2019	31
4.7 Lading	33
4.7.1 Plug-in	34

4.7.2 Induksjon	36
4.7.3 Batteri-swap	39
4.7.4 Konklusjon lading	40
5 Data og databehandling	41
5.1 Forutsetninger for databehandling	41
5.2 Beregninger	44
5.2.1 Bergen	46
5.2.2 Florø.....	49
5.2.3 Førde.....	52
5.2.4 Sandane	57
5.2.5 Sogndal.....	61
6 Analyse	65
6.1 Utforming av mulige løsninger	65
6.1.1 Bergen	66
6.1.2 Florø.....	68
6.1.3 Førde.....	68
6.1.4 Sandane	70
6.1.5 Sogndal.....	71
6.2 Konklusjon på løsning	74
7 Diskusjon	77
7.1 Ny informasjon mot slutten av oppgaven	77
7.2 Økonomi	78
7.3 Arbeidsprogresjon	80
8 Konklusjon	82
8.2 Videre arbeid	85
9 Forkortelser og ordforklaring	86
10 Vedlegg.....	87
11 Øvrige diagrammer.....	87
11.1 Figurliste	87
11.2 Tabelliste	88
11.3 Bildeliste	89
Bibliografi	91

1 Innledning

1.1 Organisering av rapport

Innledningsvis i rapporten er alle forutsetningene våre forklart. Dette er både generelle forutsetninger, som er situasjonsbeskrivende, samt mer spesifikke forutsetninger som danner grunnlaget for beregningene som er gjort. Forutsetningene er avklart med oppdragsgiver og veileder.

Det neste kapittelet (kapittel 4) er et rent teorikapittel som gir en introduksjon til blant annet batteriteknologi og hva som må forbedres for at større elfly skal kunne realiseres. Her blir også fordeler ved batteribanker som mulig lademetode beskrevet. Deretter gis det en introduksjon til flytyper vi anser som aktuelle for å realisere elektrifiseringen. Flyplassene og nettkapasiteten i områdene blir også beskrevet i dette kapittelet. Mer detaljerte beskrivelser og beregninger for den enkelte flyplass gis i kapittel 5. Videre gis det en kort introduksjon til rutelogistikk og hvor langt elektrifiseringen er kommet i dag, før kapittelet rundes av med en detaljert beskrivelse av noen mulige lademetoder.

Som nevnt i forrige avsnitt vil det neste kapittelet være detaljerte beregninger for hver enkelt flyplass. For at rapporten skal være oversiktlig og lettlest er mange av beregningene satt inn i tabeller for deretter å bli henvist til i teksten. En konklusjon for hva vi anser som en mulig løsning for hver flyplass er beskrevet i kapittel 6.

1.2 Oppdragsgiver og samarbeidspartnere

Avinor er et aksjeselskap som eies av staten og forvaltes av Samferdselsdepartementet. Selskapet drifter Norges 45 flyplasser og eier 33 av disse. De øvrige flyplassene er eid av det norske forsvaret [6]. Avinors samfunnsoppdrag er å sikre gode luftfartstjenester og flysikringstjenester i Norge, både sivilt og militært. [7]

Det er et selvfinansiert selskap og inntektene kommer utelukkende fra kommersiell virksomhet på flyplassene samt avgifter flyselskapene må betale for å ta i bruk Norges lufthavner og norsk luftrom. Overskuddet brukes til å drifte de øvrige lufthavnene [6].

I 2017 gikk Avinor inn for å klargjøre alle norske flyplasser for elektriske fly. I den forbindelse har Avinor fastsatt en visjon om å elektrifisere innenriksluftfarten innen 2040, noe regjeringen er positiv til. Avinors rolle i dette arbeidet vil være å drive lufthavnene på en måte som vil gjøre det mulig å nå denne visjonen, samt legge til rette for tilstrekkelig infrastruktur.[7]

Grunnet Norges utfordrende topografi og store avstander er luftfarten av stor betydning for å knytte Norges befolkning sammen. På 60- og 70-tallet ble det vedtatt å imøtekomme kravet om å forbedre infrastrukturen i distrikts-Norge og det ble etablert flyplasser også i distriktene [8]. Dette var starten på det vi i dag kjenner som det norske kortbanenettet. Ifølge Avinor er det kortbanenettet, i tillegg til politisk velvilje og fornybar kraftproduksjon, som gjør at Norge er særlig godt egnet til elektrifisering av innenriks luftfart [9]. De korte avstandene i luftlinje mellom flyplassene gjør Norge godt egnet for bruk av elektriske fly til tross for deres relativt korte rekkevidde.

Kortbanenettet består av kortbaneflyplasser som binder sammen de små byene og tettstedene i Norge, og kjennetegnes ved korte rullebaner, typisk 800-1500 meter [10]. Grunnet den korte rullebanen er det kun propellfly og små jetfly som kan ta i bruk disse flyplassene, og det er hovedsakelig Widerøe som flyr på kortbanenettet. Widerøe er også en av støttespillerne til Avinors omtalte prosjekt.

1.3 Problemstilling

Oppgaven går ut på å utrede muligheten for å lade elektriske fly på Avinors flyplasser på Vestlandet, henholdsvis Bergen (Flesland), Førde (Bringeland), Florø, Sogndal (Haukåsen) og Sandane (Anda). Arbeidet utføres med veiledning fra Avinor og med bakgrunn i deres visjon om å elektrifisere innenlandstrafikken i Norge innen 2040.

Vi må undersøke hvor mange flygninger det er på de aktuelle rutene per i dag og videre vurdere hvordan denne trafikken kan byttes ut med elektrifiserte fly. For å kunne gjøre disse vurderingene må vi sette oss inn i hvilke elektrifiserte fly som er tilgjengelig på markedet i dag, og hva som kan erstatte dagens fly i nærmeste fremtid. Her er spesielt rekkevidde, lengde på rullebane, kabinkapasitet og ladetid viktige faktorer.

Vi må også se på hvor mye tilgjengelig effekt det er ved de nevnte flyplassene. Dette innebærer å ta kontakt med nettselskapene i de aktuelle områdene, for å kartlegge hvor mye ledig kapasitet det er til lading i dag. Ut ifra informasjonen om ledig ladekapasitet, antall flyvninger og flybatteriene sin C-rating skal vi legge frem forslag for hvordan elektriske fly kan bli integrert i dagens infrastruktur.

Vi skal også undersøke hvilke endringer som må/kan gjøres på de enkelte flyplassene for å muliggjøre/forbedre lademuligheten på den enkelte flyplassen, henholdsvis trafobytte, legge nye linjer/kabler, bruk av batteribanker, m.m. Løsningene skal være så universale som mulig for å kunne brukes av de fleste flyprodusenter og flyselskaper.

1.4 Hovedidé for løsningsforslag

For å få til lading på de aktuelle flyplassene tror vi at det vil bli nødvendig å sette inn batteribanker på flyplassene. Årsaken til dette er at det ved de fleste flyplassene ikke er nok tilgjengelig effekt til å kunne lade direkte fra nettet per dags dato. Ved å sette inn batteribanker ved flyplassene kan disse lades opp over lengre tid, for så å bli brukt til å lade flyene. På denne måten får man et jevnt trekk fra nettet uten store effekttopper, i tillegg til at kapasiteten i nettet blir utnyttet best mulig. Flyene trenger mye effekt på kort tid, og ved direkte lading fra nett vil det oppstå enorme effektpeaker som er ugunstig for det lokale nettet, i tillegg til at det er kostbart.

Å bruke batteribankene til slik peakshaving³ vil også være kostnadsbesparende i den forstand at effektleddet⁴ reduseres. Det åpner også opp for muligheten til å ta i bruk ikke-regulerbare energikilder til lading, eksempelvis solceller, vindkraft, bølgekraft, osv. ved at vi kan lagre energien når den blir laget for så å bruke den når den trengs.

På enkelte flyplasser med stor trafikk gjennom hele dagen, kan det være mer kostnadseffektivt å bygge ut strømmettet for å kunne lade direkte fra nettet. Ved tilfeller der det til enhver tid er et til to fly stående til lading, vil det nærmest oppleves som en jevn last på nettet, selv om man i realiteten kobler flyene til og fra. Kostnadene ved utbygging av nettet kan trolig bli lavere enn kostnadene ved batteribanker fordi vedlikeholdskostnadene på batteribanker er større enn på strømlinjer.

Grunnet begrensninger på passasjerantall og rekkevidde på de aktuelle elflyene som kommer i overskuelig fremtid, ser vi for oss at det vil være nødvendig å legge opp til en «hub-and-spoke model». Dette går ut på at passasjerer flys fra de små flyplassene til de større flyplassene, hvor passasjerene kan reise videre med konvensjonelle fly.

Før en konkret ladeløsning av elektriske fly kan legges frem må flyprodusentene bli enige om en standardisert løsning på ladesystemene. Så lenge slike standardiserte systemer ikke finnes, har vi kun mulighet til å legge frem kvalifiserte gjetninger på hvor store effekter hvert fly trenger til lading. I rapporten blir fordeler og ulemper ved de forskjellige systemene diskutert.

³ Forklart i ordforklaringer

⁴ Forklart i ordforklaringer

1.5 Begrunnelse

I dag satser Norge stort på å elektrifisere transportmidler som biler, busser, tog og ferger. Elektrifisering av flytrafikken har lenge blitt sett på som urealistisk, ettersom batterier tradisjonelt sett har vært for tunge til å kunne brukes i fly. Ny teknologisk utvikling og forskning, spesielt på elbilbatterier, har gjort at man nå ser at det begynner å komme batterier som muliggjør elektrifiserte fly.

I dag finnes det allerede en- og toseters elektriske fly på markedet, men flere flyprodusenter planlegger å produsere større fly de kommende årene. Når disse flyene kommer på markedet, kan elektrifiseringen realiseres. Widerøe, som i dag opererer de fleste flyvningene på kortbanenettet i Norge, har gitt uttrykk for at de på sikt ønsker å bytte ut sin Dash-8 flåte med elektriske fly. [37]

Det hevdes at Norge er spesielt godt egnet til å ta i bruk elektrifiserte fly da flere av Norges flyplasser er små med relativt korte avstander mellom i luftlinje. Den norske topografien gjør det også mer effektivt å benytte luftfart kontra båt eller bil, da den reelle reiseavstanden er stor i forhold til luftlinjeavstanden.

I Norge er det politisk vilje til å innføre elektrifiserte fly som et tiltak for å redusere klimaavtrykket. Avinor, som eier de fleste kommersielle flyplassene i Norge, har en visjon om at norsk innenlandstrafikk skal være elektrifisert innen 2040. [9][29]

Vi valgte dette temaet til vår bacheloroppgave med bakgrunn i interessen og den politiske velviljen, i tillegg til at temaet er svært fremtidsrettet. Det er foreløpig ikke kjent for oss om noen andre har sett på problemene rundt lading av elektrifiserte fly. Derimot har mange tidligere sett på lading av elektriske ferjer, og vi ser at flere av de samme problemstillingene dukker opp.

Flere av flyplassene vi ser på ligger avsides til, og i områder uten spesielt mye nettkapasitet. Dette gir utfordringer da flybatteriene krever relativt store effekter levert på kort tid. Med dette temaet kommer vi til å lære om blant annet peakshaving, batteribanker, elfly, lademetoder og mye mer. Temaet er svært spennende og noe vi ønsker å lære mer om. I tillegg er temaet interessant og aktuelt i dagens marked, og med den kunnskapen vi tilegner oss antar vi at vil bli etterspurt og aktuell videre i våre karrierer.

2 Kravspesifikasjon

I kravspesifikasjonen legger vi frem konkrete mål for hva vi ønsker å få frem i oppgaven. Den er delt inn i to kategorier, hva vi *skal* og hva vi *kan* gjøre. Det vi *skal* gjøre er temaer vi skal svare på mens det vi *kan* gjøre er temaer vi kan se på dersom vi får tid og mulighet til det i løpet av oppgaven.

Vi skal...

- Utrede muligheten for lading av elektriske fly ved flyplassene på Vestlandet; Bergen, Florø, Førde, Sandane og Sogndal
- Undersøke hva som er mulig å få til med dagens nettkapasitet, hva som er nødvendig for å kunne erstatte dagens flykapasitet, eventuelt også hvordan en slik utbygging kan gjøres
- Ta hensyn til ladetid, flytyper og lademetoder
- Gjøre beregninger for hvor mange fly flyplassene maksimalt kan håndtere med dagens tilgjengelige nettkapasitet
- Beskrive forskjellige lademetoder og foreslå den mest gunstige løsningen. Løsningen skal være mest mulig universal
- Vurdere hvilke muligheter som er mest økonomisk gunstig

Vi kan...

- Se på forslag til utforming av ladestasjon
- Se på muligheten for/anbefale nytt flymønster mellom flyplassene for å utnytte lademulighetene best mulig

3 Forutsetninger

3.1 Generelle forutsetninger

Vi har studert flyvningene mellom Bergen, Florø, Førde, Sandane og Sogndal. For de fire sistnevnte er alle flyvningene til/fra tatt hensyn til, dette inkluderer Ørsta/Volda og Oslo i tillegg til de andre nevnt over. Vi antar at flyene fra Ørsta/Volda og Oslo må fullades når de ankommer de nevnte flyplassene selv om de ikke nødvendigvis har flatt batteri, i tillegg til at de har muligheten til å lade på destinasjonsflyplassen. For Bergen har vi kun tatt hensyn til flyene som går til/fra de øvrige flyplassene.

Vi har forutsatt at flyene flyr korteste vei i luftlinje og avstanden er beregnet ved bruk av Kartverket sitt måleverktøy. Derimot, dersom flyet ikke rekker frem til destinasjonsflyplassen helelektrisk antar vi at de benytter APU⁵ som rekkeviddeforlenger.

Widerøes Dash-8-100-fly som benyttes på de aktuelle strekningene, er spesielt utviklet for å lette og lande på korte rullebaner, og en forutsetning for de elektrifiserte flyene som tas i bruk er at også de evner å lande på disse rullebanene [17].

Vi har forutsatt at det ikke blir gjort endringer i dagens rutetabell. Dette må det antageligvis gjøres i fremtiden, men det er en altfor stor logistikkoppgave til at vi kan ta hensyn til dette.

I tillegg til lading av elektriske fly trengs det også effekt til mange andre områder på en flyplass. I fremtiden vil trolig all trafikk på en flyplass være elektrisk, deriblant shuttletrafikk, bagasjetransport, biler, samt lading av biler på kundeparkeringen. Disse faktorene har vi ikke tatt stilling til i vår oppgave og må beregnes i tillegg til våre resultater for å få en fullstendig oversikt over effektbehovet ved lufthavnene.

⁵ Forklart i ordforklaringer

Problemstillingene knyttet til elektrifiseringen av luftfarten er mange, og fordi det er et relativt nytt og fremtidsrettet tema finnes ikke all den nødvendige teknologien per i dag. En annen utfordring er at selskaper som utvikler denne teknologien holder kortene tett til brystet og har ikke ønsket å oppgi nødvendig informasjon for at vi skal kunne legge frem komplette og godt beregnede forslag til løsninger. Dette har medført at vi har måtte ta en del forutsetninger og antakelser uten å få disse bekreftet fra produsentene. Forutsetningene og antakelsene er gjort i samråd med Avinor, samt ut fra opplysninger vi har fått fra andre kilder.

3.2 Forutsetninger for beregningene

Beregningene er gjort på bakgrunn av opplysninger og verdier fra Avinor sin rapport "Introduction of Electric Aircraft in Norway". Det understrekes at løsningene og konklusjonene i oppgaven må anses som forslag. For at beregningene skal kunne benyttes så snart elektrifiseringen starter er beregningene gjort med hensyn på 12- og 19-seters fly. Hovedargumentet for dette valget er at elektriske 12- og 19-setere er planlagt å komme i drift i løpet av 2025-2030, mens det er enda lengre til fly med større kabinkapasitet blir elektriske. Beregningene er skalerbare slik at man enkelt kan legge inn økning i trafikk eller endring av flytyper og flygninger.

Avinors ruteplaner er brukt for å finne informasjon om når flyene lander, letter og antall fly som reiser til/ fra de aktuelle flyplassene. Disse opplysningene er brukt til å beregne flyenes bakketid, såkalt turnaround-tid⁶, i tillegg til at det gir en indikator på når flyplassene er i drift. I samråd med Avinor er det antatt at turnaround-tiden kan benyttes fullt ut til lading. Disse faktorene vil naturligvis variere fra flyplass til flyplass og er essensiell i beregning av effektbehovet.

Det har vist seg at 15 min turnaround-tid er normalen på de aktuelle flyplassene, foruten om noen tilfeller hvor flyene står lengre. Med bakgrunn i denne observasjonen forutsettes det at flyene kan lade i totalt 15 min. Lengre ladetid vil resultere i lavere momentant effekttrekk fra batteribanken/nett, noe som resulterer i at man ikke er avhengig av like høy effekttilførsel.

⁶ Forklart i ordforklaringer

I beregningene er alle faktorene beskrevet over satt til dagens verdier, selv om de sannsynligvis vil endre seg når elektrifiseringen er et faktum. I fremtidig arbeid bør derfor faktorene revurderes og tilpasses.

De eneste tekniske dataene vi har fått på elektriske fly er Zunum sin 12-seter og 48-seter, henholdsvis ZA10 og ZA50 [1]. Dermed er det disse dataene som legges til grunn i beregningene. Dataene er blant annet brukt i beregninger for størrelsen på batteripakkene ombord i flyene og batteripakkens nødvendige C-rate.

ZA10

- Kabinkapasitet \times Energiforbruk \times Rekkevidde = Batterikapasitet
- $12 \text{ seter} \times 0,12 \frac{\text{kWh}}{\text{sete}/\text{km}} \times 175 \text{ km} = \mathbf{252 \text{ kWh}}$
- $C = \frac{\text{Motorstørrelse}}{\text{Batterikapasitet}} = \frac{1 \text{ MW}}{252 \text{ kWh}} = \mathbf{3,97 \text{ C}}$
- $\text{Energitetthet} = \frac{\text{Batterikapasitet}}{\text{Vekt}} = \frac{252 \text{ kWh}}{688 \text{ kg}} = \mathbf{366,3 \text{ Wh/kg}}$

ZA50

- Kabinkapasitet \times Energiforbruk \times Rekkevidde = Batterikapasitet
- $48 \text{ seter} \times 0,1 \frac{\text{kWh}}{\text{sete}/\text{km}} \times 250 \text{ km} = \mathbf{1200 \text{ kWh}}$
- $C = \frac{\text{Motorstørrelse}}{\text{Batterikapasitet}} = \frac{4.5 \text{ MW}}{688 \text{ kWh}} = \mathbf{4.33 \text{ C}}$
- $\text{Energitetthet} = \frac{\text{Batterikapasitet}}{\text{Vekt}} = \frac{1.2 \text{ MWh}}{3470 \text{ kg}} = \mathbf{345.8 \text{ Wh/kg}}$

Med bakgrunn i beregningene over antar vi at batteripakkene ombord i flyene må ha en C-rating på 4-5 C og batterikapasitet på 252 kWh og 1200 kWh for hhv. ZA10 og ZA50. I tillegg trengs det en energitetthet på mellom 350 Wh/kg og 500 Wh/kg på batteriene ombord. Dette er verdier man kan finne i batterier som eksisterer i dag. [19][3] Det er antatt at batteriene kan lades opp like raskt som de lades ut og at det vil være mulig å redusere C-ratingen enten ved å øke totaleffekten på batteriet, eventuelt forlenge tiden flyene lader. Ingen av flyprodusentene har gitt informasjon om regenerering ved nedstigning. Dersom det viser seg at flyene får regenerert effekt inn på batteriene under innflyvningen resulterer det i et mindre ladebehov.

I dialog med nettselskapene ved de aktuelle flyplassene har vi fått et anslag på hvor mye ledig nettkapasitet som kan benyttes til lading av elektriske fly. Tallene er anslagsvise, så her bør det foretas mer nøyaktige beregninger av nettselskapene før mer konkret arbeid påbegynnes. Selv om utbygging av nettet er sannsynlig, er det verdiene fra nettselskapene som brukes i beregningene. Det har ikke blitt oppgitt om det er mer ledig nettkapasitet på spesifikke tidspunkter av døgnet (typisk natt) som kan brukes til å lade opp en eventuell batteribank, for deretter å bruke dette til å drifte på dagtid. Dette er noe som bør ses nærmere på ved en eventuell utbygging.

Flyplass	Tilgjengelig kapasitet [kW]	Mulig kapasitet [kW]
Bergen lufthavn, Flesland	-	-
Florø lufthavn	500	-
Førde lufthavn, Bringeland	1000	1800
Sandane lufthavn, Anda	300	-
Sogndal lufthavn, Haukåsen	-	-

Tabell 3.1: Tilgjengelig effekt i nettet

Ved ankomst er det forutsatt at flyene må fullades fra null. Sannsynligheten for at dette er tilfelle er svært liten, da kravene tilsier at flyene skal ha nok rekkevidde til å kunne fly til en alternativ flyplass ved feil på destinasjonsflyplassen, eventuelt sirkle rundt i påvente av klarsignal for landing. Alle beregningene er dermed utført i henhold til verst tenkelige tilfelle.

Kabinkapasiteten til Widerøes Dash-8-100 fly er på 39 seter. Dersom flygningene skal erstattes med for eksempel Zunum ZA10, med en kabinkapasitet på 12 seter, må antall flyvninger i løpet av et døgn økes i forhold til dagens ruteplan for å oppnå samme kabinkapasitet.

For å beregne hvor mange elektriske fly som er nødvendig for å erstatte dagens flyvninger har vi gjort noen antagelser. Vi har blant annet antatt at det i gjennomsnitt benyttes 50% av kabinkapasiteten på flyvninger på Vestlandet. Årsaken til dette er at man på disse reiserutene har muligheten til å benytte seg av andre transportmidler, som bil, buss og ferje/hurtigbåt. På rutene fra Vestlandet til Oslo antar vi at gjennomsnittet ligger på 75% av kabinkapasiteten. Dette fordi at man på dette strekket ikke har samme muligheten til å benytte alternative transportmidler.

Beregningene er gjort med hensyn på utbytting av 5 til 30 flyvninger med ZA10-flyene per døgn. Dette spranget er valgt for å se hvilke effektbehov som er nødvendig ved utbytting av kun enkelte flyvninger kontra alle flyvningene på en flyplass. Det er også sett på mulighetene for å bytte ut alle dagens flyvninger med Zunum sitt ZA50. I dette tilfellet vil det ikke være nødvendig å sette opp flere avganger for å dekke dagens kabinkapasitet. Dog er ikke disse flyene forventet å komme i produksjon før en god stund frem i tid. Uavhengig av det har vi valgt å ta disse flyene med i beregningene våre da det vil gi en oversikt over effektforbruket i løpet av et døgn uten å måtte endre dagens ruteplan.

Prisen på en eventuell batteribank på flyplassen er en viktig faktor for hva som er en god vurdering, men det er ikke tatt stilling til i dette tilfellet da batteribankleverandørene vi har vært i kontakt med ikke har vært villige til å gi et prisestimat. Det understrekes at løsningene og konklusjonene i oppgaven må anses som forslag.

4 Teori

4.1 Batteriteknologi

Batteriteknologien er i stadig utvikling, og bare de senere årene har utviklingen skutt fart og batteriene blir stadig bedre og lettere. Batteribanker er brukt i flere sammenhenger, alt fra lading av små mobiltelefoner til store ferjer. Det er flere faktorer som avgjør i hvilke bruksområder et batteri er hensiktsmessig. For batteri i fly er det nødvendig med lite vekt og høy lagringskapasitet for å kunne transportere nok energi til en hel flygning. Teknologien er ikke kommet langt nok til at store elfly kan fly langt enda, men om utviklingen fortsetter i samme tempo som de siste årene er visjonen om elektrisk luftfart innenfor rekkevidde.

4.1.1 C-rating

C-ratingen [C] indikerer hvor hurtig et batteri kan lades opp eller lades ut. C-ratingen forteller oss hvor mye av den lagrede energien man kan hentes ut fra batteriet til enhver tid, i tillegg til hvor lenge batteriet vil kunne levere denne effekten. For eksempel vil et batteri på 1 kWh med en C-rating på 1.0C kunne levere 1kW i en time. Et batteri med lik kapasitet, men en C-rating på 2C, vil kunne levere 2kW i en halvtime.

Erfaringer tyder på at batterier sannsynligvis lader raskest mellom 10% og 90%. På grunn av dette vil C-ratingen forandre seg gjennom ladesyklusen. Den oppgitte C-ratingen på et batteri vil derfor være den gjennomsnittlige verdien av C-en gjennom ladesyklusen. Ideelt sett skulle man ønske at det ikke var noen begrensninger på C-ratingen og at den ikke varierer under opp- og utladning, men slik er det ikke. Det ligger begrensninger i hvor stor C-ratingen på et batteri vil kunne være, avhengig av hvilke grunnstoffer batteriet er bygget opp av, samt oppbyggingen av selve batteriet. Høy C-rating, altså store mengder effekt over kortere tidsrom, vil også gi problemer med varmgang.

En gjenganger er at batterier med høy C-rating (C-rating $\geq 5C$) vil ha en relativt lav energitetthet (rundt 80 kW/kg) i tillegg til at batteriene vanligvis ikke overlever mange sykluser. Batteriene med størst C-rating per i dag er på rundt 30C. Disse batteriene blir blant annet benyttet i droner og lignende utstyr som er veldig vektfølsomme, men som trenger mye effekt på kort tid.

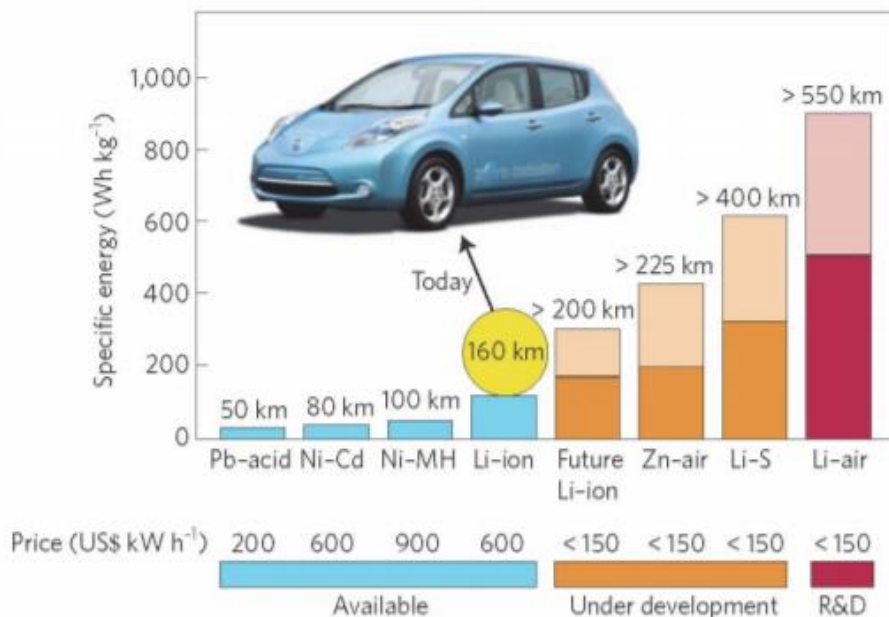
Det er bruksområdet til batteriet som avgjør hvilken C-rating det burde ha, med utgangspunkt i hvor raskt det er behov for å få tilført effekt. I vårt tilfelle er man avhengig av batterier med både høy C-rating og høy energitetthet. Dette skyldes at batteriene må kunne levere store mengder effekt over en kort periode ved letting, de må kunne lades opp relativt raskt på korte turnarounds, i tillegg til at batteriet må kunne levere nok effekt til hele flyvningen. Det vil også være en begrensning på batterivekten flyene kan ha med seg, da et fly skal være så lette som mulig. Tyngre fly krever også naturligvis mer energi. [3]

4.1.2 Nyere batteriteknologi

Litium (Li) er det letteste av alle metaller, og litium-batteriene har per i dag den høyeste energitettheten. Batteriene er oppladbare og brukes blant annet i mobiler, elektriske verktøy og i elektriske biler. Rent batterimessig er steget fra elektriske biler til elektriske fly enormt, hovedsakelig på grunn av en batteriteknologi som per i dag ikke er god nok. Vekten på batteriet spiller også en vesentlig stor rolle når det skal installeres inn på et fly.

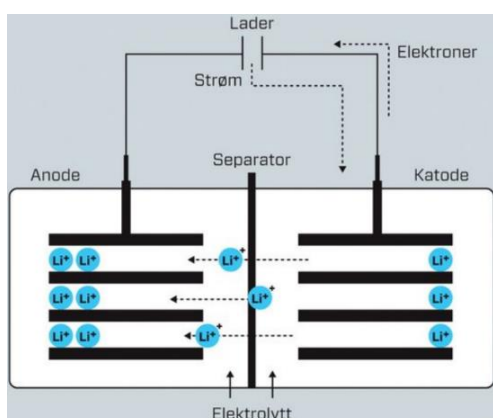
Som nevnt tidligere trengs det mye energi til letting. Dagens konvensjonelle fly mister en del vekt under letting da mye drivstoff forbrennes, og vekten minker også gjennom hele flygningen. De elektriske flyene derimot mister ikke vekt etterhvert som energien blir brukt opp, noe som gjør at energitettheten må være lav på batteriene som tas i bruk i elfly.

I rapporten blir det ikke gått detaljert inn på hvilket batteri som burde installeres på flyet da dette havner utenfor problemstillingen. Batteriteknologien er ikke nok utviklet for bruk i kommersielle elfly og dermed er det uvisst hvilke batteri som kommer til å bli brukt. I dette kapitlet beskrives de batteritypene som er kommet lengst i utviklingen og som dermed er ansett som mest aktuelle per dags dato.

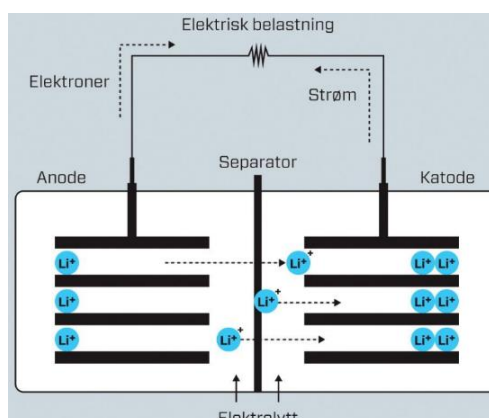


Bilde 4.1: Sammenligning av ulike batterier. (R&D: "Research and Development")

Li-ion batteriene består av en katode, anode, elektrolytt og separator. Katoden er den positive delen av batteriet og er ofte bygd opp av oksid-elektroder. Anoden, som er den negative delen av batteriet, består ofte av karbonelektroder. For at Li-ionene skal kunne bevege seg mellom anoden og katoden, er anoden og katoden senket i en elektrolytt. For at det ikke skal oppstå en kortslutning mellom anoden og katoden er det behov for en separator. Separatoren er av et porøst materiale som slipper gjennom Li-ionene. Ved utlading beveger positive litium-ioner seg fra anoden, gjennom elektrolytten og separatoren, og til katoden. Ved oppladning går prosessen motsatt vei. [13]



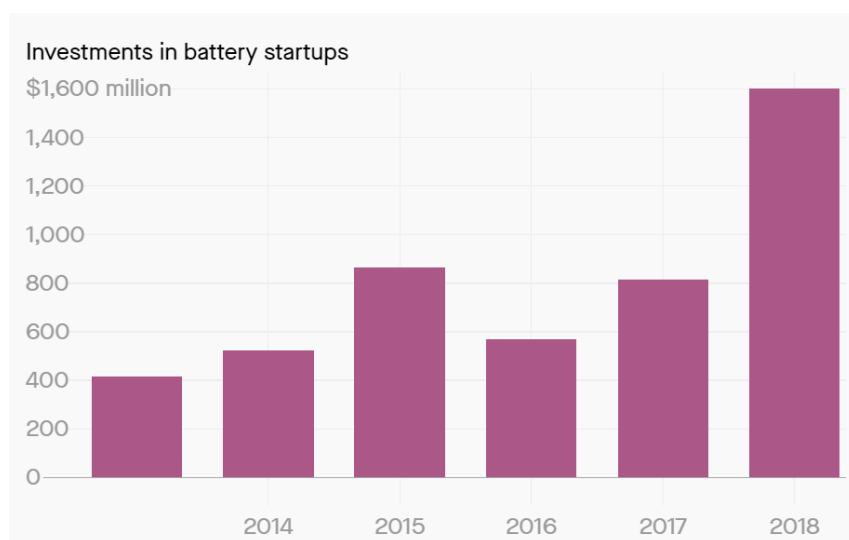
Bilde 4.2: Oppladning av Li-ion batteri



Bilde 4.3: Utladning av Li-ion batteri

Elektrolytten i Li-ion batteriene er enten i flytende form eller polymer form (geleaktig masse). Derimot, såkalte solid-state batterier, hvor elektrolytten er i fast form, har høyere energitetthet, tar mindre plass og gir økt rekkevidde. Disse batteriene lades raskere opp i tillegg til at de holder seg kaldere og er dermed mindre brannfarlige.

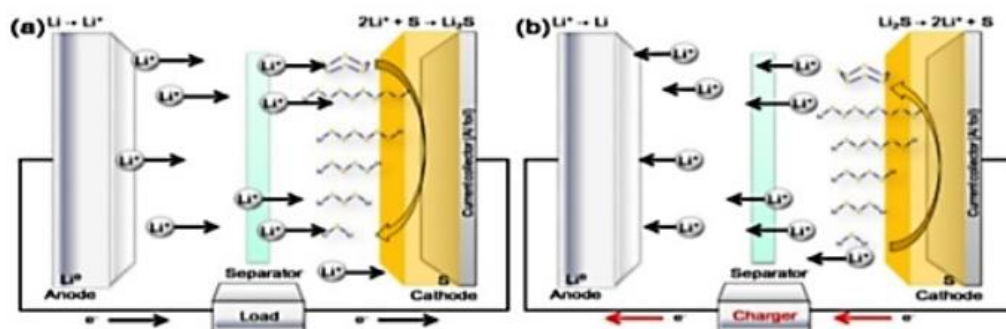
I overgangen fra konvensjonelle fly som går på drivstoff til elektriske fly er der som nevnt tidligere flere hinder. Hovedutfordringen med dagens batteriteknologi er at energitettheten er svært lav i forhold til "vanlig" flydrivstoff. Til sammenligning gir flydrivstoff opptil 43 ganger mer energi enn det beste litium-ion batteriet per kilogram. Problemstillingen knyttet til dagens Li-ion batterier med for lav energitetthet og utviklingen av mer energitette solid-state batterier har ført til en sterk økning i investeringen i batteriindustrien [14].



Bilde 4.4: Økning i investeringen i batteriindustrien

Litium-ion batteriene er den type batteriteknologi som brukes mest i blant annet elektriske biler, men flere forskere mener denne teknologien begynner å nærme seg en teoretisk grense på 250 Wh/kg. Parallelt som det foregår forskning på hvordan litium-ion batteriene kan forbedres, er det satt i gang store prosjekter hvor det undersøkes alternative batterier der energitettheten er større. Per dags dato er det litium-sulfur batteriene som skiller seg positivt ut. Derimot er det flere egenskaper ved litium-sulfur batteriene som må utbedres før det kan ta opp kampen med litium-ion batteriene. Levetiden er blant aspektene som må forbedres, da litium-ion batteriene kan tåle opptil 1200 sykluser, mens litium-sulfur er nede i 100 sykluser. Høye kostnader ved produksjonen av disse type batteriene byr også på utfordringer [33].

På lik linje med Li-ion batterier består også litium-sulfur batteriet av en katode, anode, elektrolytt og separator. Til forskjell fra Li-ion batteriet består denne katoden av karbon-sulfur mens anoden er av litiummetall. Ved utladning vandrer litium-ioner og elektroner fra negativ elektrode mot positiv elektrode. I prosessen produseres litium-polysulfider og energi frigjøres. Ved oppladning er prosessen omvendt. Figuren under viser hvordan prosessene foregår.



Bilde 4.5: Prosessen for utladning (a) og oppladning (b) for litium-sulfur batteri

4.1.3 Batterier i fly

Grunnpilaren i oppgaven er at det finnes elektriske fly som er i stand til å fly fra en flyplass til en annen og samtidig frakte passasjerer. I dag finnes det kun mindre elektriske fly med plass til en eller to personer. Disse flyene er tenkt brukt som testplattformer, «proof of concept», og i noen tilfeller til bruk ved flyskoler. Dette er ikke relevante å se på i forhold til vår oppgave da de er for små og med for kort rekkevidde.

Det er flere selskaper som allerede nå prosjekterer større elektriske fly, alt fra 9-setere til 48-setere, men de er enten på tegnebrettet eller i testfasen. [16] [1] Flyene som er mest relevante for oppgaven er enten 12- eller 9-setere fra Eviation og Zunum. Disse flyene er nærmest å komme ut på markedet og vil sannsynligvis være de som tas i bruk først.

Selskapene som lager disse flyene er svært hemmelighetsfulle og lite villige til å dele informasjon om hvilke typer batterier som tas i bruk i flyene. På grunn av dette er det besluttet å ikke inkludere batteriene i flyene i noen særlig grad og heller fokusere på batteribankene på bakken. Det er likevel satt visse forutsetninger for batteriene om bord for å kunne utføre beregningene i rapporten. Disse forutsetningene er nevnt i kapittel 3.2, men kort oppsummert er det en lagringskapasitet på mellom 350 Wh/k og 500 Wh/kg, og en C-rating på 4-5C [1].

Batteriprodusenten OXIS Energy har batterier på over 400 Wh/kg og har som mål å lage batterier på 500 Wh/kg noe som underbygger forutsetningen om at de nødvendige batteriegenskapene er innenfor rekkevidde [19].

$$Kabinkapasitet \times Energiforbruk \times Rekkevidde = Batterikapasitet$$

$$12 \text{ Seter} \times 0,12 \frac{\text{kWh}}{\text{sete}/\text{km}} \times 175 \text{ km} = \mathbf{252 \text{ kWh}}$$

$$C = \text{Motorstørrelse} / \text{Batterikapasitet} = 1 \text{ MW} / 252 \text{ kWh} = \mathbf{3,97 \text{ C}}$$

[1]

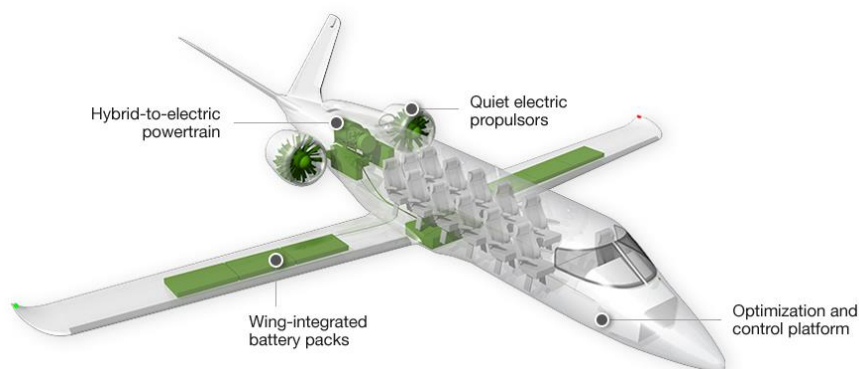
4.1.4 Rekkeviddeforlenging

Dagens to-seters elektriske fly er fullelektriske, men 12-seters flyene, for eksempel Zunum ZA10, vil i første omgang sannsynligvis komme med hybridløsninger. Igjen skyldes dette at batteriteknologien per dags dato ikke er god nok. Hybridløsningene vil trolig fungere ved at man har en turbingenerator i halepartiet på flyene. I dag har de fleste fly en slik generator, en APU, som brukes til å lage strøm, hydraulisk trykk og trykkluft når hovedmotorene ikke går. APU-en brukes også for å starte opp hovedmotorene.

Zunum har gitt uttrykk for at de vil sette inn en 500kW turbingenerator i sine ZA10 fly. Dette gir flyet en rekkevidde på 210 km rent elektrisk, og 1130 km dersom rekkeviddeforlengeren blir tatt i bruk. På samme måte vil ZA50-flyet ha en elektrisk rekkevidde på 500 km elektrisk og 1290 km ved hybrid flyvning. Dette er oppdaterte tall i forhold til de i tabell 4.1 som er bakgrunnen for beregningene. På denne måte vil flyene kunne fly korte avstander fullelektrisk, med mulighet for lengre avstander ved å bruke rekkeviddeforlengeren. Slik vil flyet kunne nå destinasjoner som ligger på grensen av sin elektriske rekkevidde.

Rekkeviddeforlengeren gir også en økt sikkerhet dersom det skulle oppstå en uforventet hendelse som gjør at flyet må være lengre i luften enn først planlagt. I utgangspunktet skal ikke rekkeviddeforlengeren brukes, men den gjør at de elektriske flyene med ganske kort rekkevidde tilfredsstiller kravene om nok rekkevidde til holding⁷ og eventuelt retur. [32]

Når man velger å sette inn en APU må man også ha med seg drivstoff til denne. I Zunum sitt tilfelle blir dette en ekstra vekt på 590 kg for ZA10 og 2050 kg for ZA50. Dette er vekt man i teorien egentlig kunne brukt til batterier, men foreløpig har de fleste flyselskapene gitt uttrykk for at de av sikkerhetsmessige grunner sannsynligvis kommer til å gå for en hybridløsning på de første flyene. Etterhvert som batteriene blir bedre vil det være mulig å erstatte drivstofftanker og APU med større og eventuelt flere batterier.



Bilde 4.6: Hybridfly

⁷ Forklart i ordforklaringer

4.2 Batteribanker

For å fullade batteriene på flyet må man kunne levere høy effekt på kort tid. Hver av flyplassene i denne oppgaven mangler i dag denne overføringsevnen grunnet mangel på effekttilførsel til området samt en infrastruktur (kabler, transformatorer, osv.) som ikke er dimensjonert for slike effektoverføringer. For å løse dette problemet er batteribanker et alternativ.

Ved å ta i bruk batteribanker til lading av fly vil man kunne:

- Bruke batteribanken til peakshaving på nettet
- Ha en nødkilde i tilfelle strømbrydd
- Lagre energi fra nettet når nettkapasiteten er god og eventuelt lagre energi fra fornybare kilder på flyplassen, f.eks. solceller, og bruke det ved behov (effektfordeling)
- Ha lavere effektledd
- Overføre høyere effekter enn det nettet kan levere
- Ha en energikilde for å opprettholde stabil frekvens- og spenningsregulering i nettet lokalt

Firmaer som Tesla har i flere år jobbet med batterisystemer i kraftnettet. Et av de mest kjente anleggene deres, Hornsdale Power Reserve, ligger i Australia og har vært i drift i nesten to år. Anlegget har en kapasitet på 129 MWh og en overføringsevne på 100 MW, noe som er meget imponerende i så stor skala og det viser at ekstremt store batterianlegg er mulig å få til med dagens teknologi. [26] Hornsdale er laget som en nødreserve for området og skal ta effekttopper i kraftnettet i Sør-Australia.

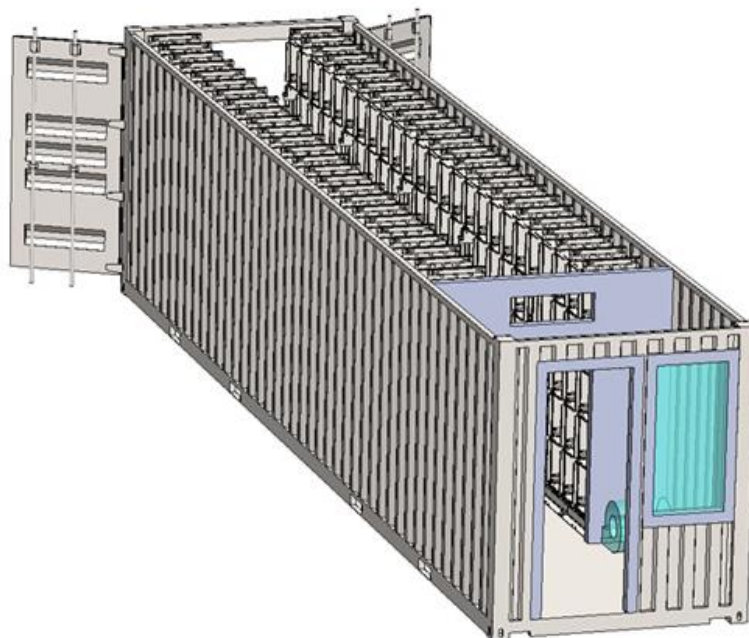
Tesla har også et system de kaller Powerpack. Her har hver enhet 210 kWh kapasitet og 50 kW overføringsevne. Enhetene kan også settes sammen for å oppnå ønsket kapasitet. Bruken av disse er rettet mot nødreserve i boliger og lettere industri, til å ta effekttopper og for å kunne lagre energi fra nettet når strømprisene er lavest. [27] Disse utfører altså ikke de samme oppgavene som batteribankene man trenger på en flyplass, men kan likevel gi en pekepinn på hvordan et slikt anlegg kan prosjekteres.

4.2.1 Hvilke typer er aktuelle?

Corvus Energy er et firma med kontorer i Bergen og har siden 2009 levert energilagringssystemer for blant annet marin- og havnapplikasjoner, noe de har vunnet flere innovasjonspriser for. Firmaet har meget god erfaring i marine- og industrielle applikasjoner, samt innen design og produksjon av energilagringssystemer (ESS) og avanserte batteristyringssystemer.

Batterimodulene deres er lagt opp i shippingcontainere og skal kunne driftes enkelt. Containerne er laget slik at kjøling, ventilasjon, kapasitet, koblinger og kommunikasjon mellom modulene skal være enkelt å styre og overvåke.

De har for øyeblikket to forskjellige moduler på markedet; en 20 fots og en 40 fots container. Den største containeren vil ha kapasitet på 1365 kWh med bare batterier, mens med kraftelektronikk integrert i containeren går kapasiteten ned til 819 kWh [28]. Dette tyder på at ved de mest belastede flyplassene vil man trenge 4-5 slike moduler, noe som er mulig å få til i praksis.



Bilde 4.7: Skisse av en batteribank

For at batteribankene skal kunne levere effekt til flyet på en optimal måte bør de plasseres så nærme oppstillingsplassen som mulig. Den høye effekten som skal overføres, kombinert med den relativt lave spenningen på batteriene, vil gi en stor strøm. Denne strømmen vil føre til betydelige tap i overføringen mellom batteriet og flyet dersom avstanden er stor. De må også muligens modifisere batterimodulene for å holde samme spenning som batteriene i flyet.

4.2.2 Backup

Av sikkerhetsmessige årsaker er det i dag krav om at flyene må ha et fuelreserve ombord. Flyselskapene ønsker derimot ikke å ha med seg alt for mye drivstoff da dette gjør flyene tyngre. Tyngre fly fører til større drivstofforbruk, som igjen øker kostnadene.

På elektriske fly blir ikke vekten på batteriet påvirket av om de er fulladet eller ikke. Dette medfører at man kan anta at flyselskapene kommer til å ønske å fullade batteriene ved hver landing for å slippe å måtte bruke dyrere drivstoff til å drive rekkeviddeforlengeren. Det at batteriene på flyene i første omgang ikke er spesielt store gjør også at flyene mest sannsynlig må lade opp batteriene hver gang de lander uansett.

Med det stabile strømnnett i Norge, som har en oppetid på 99,988% [38], er sannsynligheten for strømstans rimelig lav. Det er derfor lite sannsynlig at flyene lander på en flyplass uten å få ladet opp batteriene igjen. Om man likevel ønsker en reserveløsning ved tilfeller med strømstans, anbefaler vi et dieselaggregat på flyplassen. Her bør man ta en vurdering i samråd med det lokale nettselskapet om hvor stor sannsynlighet det er for at den enkelte lufthavnen kan oppleve et strømbrudd, hvor lenge man risikerer å være uten strøm, og konsekvensene av en slik strømstans. Ut ifra en slik risikovurdering kan man ta en avgjørelse på hvor store dieselaggregater man behøver.

I denne sammenheng kan det vurderes om Førde lufthavn kan operere som et knutepunkt for de omkringliggende, mindre flyplassene på Vestlandet. Hvis det skulle oppstå et strømbrudd på en av de mindre flyplassene, kan flyene omdirigeres til Førde og lade der. Dette fører til at man trenger mindre energireserver på flyplassene rundt, men at batterianlegget/nettilførselen på Førde lufthavn til en viss grad bør overdimensjoneres slik at den er i stand til å ta imot flere fly.

4.3 Flytyper

4.3.1 Oversikt over kommende fly

Det finnes et mangfold av flyprodusenter som satser på elektriske fly. Mange av disse produsentene holder kortene tett til brystet, noe som gjør det vanskelig å gi en grundig vurdering. I dette kapittelet ønsker vi å presentere et utvalg av flytyper, og vurdere de ut fra den tekniske infoen vi har til rådighet samt den oppgaven de skal utføre. Vi har valgt å fokusere mest på flytyper med kabinkapasitet på 12-19 personer. Dette er fordi endringer i lovverket vil gi flyselskapene mulighet til å bruke mindre fly på dagens FOT-ruter, og fordi dagens flyvninger ikke alltid fylles opp. Man vil derfor ofte bare trenge 1-2 fly med lavere kabinkapasitet som erstatning for dagens fly med 39 seter. [31]

Det må poengteres at det finnes to typer elektriske fly; fullelektriske som kun får energien fra batterier ombord, og elektrifiserte som kan bruke en rekkeviddeforlenger i tillegg. Alle flyene har forskjellige kvaliteter og bruksområder, så det er derfor valgt ut en håndfull alternativer som vi anser som de mest aktuelle. All den tekniske informasjonen som er tilgjengelig for det offentlige er oppgitt under hver flytype.

4.3.1.1 Airbus

I dag jobber Airbus sammen med Rolls Royce og Siemens for å utvikle testplattformen Airbus E-Fan X, som er basert på flytypen BAe 146. De har hatt suksess med mindre hybridfly til nå, og ønsker videre å bytte ut en av fire jetmotorer med en 2 MW elektrisk motor på et større jetfly (100+ passasjerer). Airbus har som mål å starte testing av E-Fan X i løpet av 2020, og å få et fly med hybridløsninger i drift innen 2030 [4]. Denne flytypen er trolig ikke aktuell for drift på kortbanenettet i Norge, men kan bli høyst aktuell for lengre flyruter og utenlandsflygninger på sikt. [5] Det har derfor blitt valgt å ta den med i utredningen.

Det er også verdt å nevne at Airbus og SAS nylig har startet et samarbeid for å se på hva som kreves av fly, infrastruktur og flyselskaper når større passasjerfly skal drives elektrisk/hybridelektrisk [39].



Bilde 4.8: Hybridflyet Airbus E-Fan X som er basert på flytypen BAe 146

4.3.1.2 Zunum Aero

Zunum er et underselskap av Boeing som utvikler både 12- og 48-seters passasjerfly. I utgangspunktet utvikles hybridvarianter med en 500 kW turbogenerator som rekkeviddeforlenger ombord. De jobber også med å utvikle fullelektriske fly, men dette krever fremgang innenfor batteriteknologien. 12-seteren deres skal etter planen lanseres i løpet av 2022. [11]

Flyrutene i denne oppgaven bruker per i dag 39-seters passasjerfly, så man vil derfor måtte bruke tre 12-setere for å dekke dagens kabinkapasitet. Som nevnt innledningsvis er flyene på kortbanenettet som regel ikke fulle, og det vil derfor ofte være nok med 1-2 elektrifiserte fly. Det er bekreftet at 12-seteren evner å lande på samtlige av de korte rullebanene på Vestlandet, så Zunum er derfor blant de mest aktuelle kandidatene.



Bilde 4.9: Fly fra Zunum

Data	Zunum ZA10	Zunum ZA50
Kabinkapasitet [seter]	12	48-60
Maksimal fremdriftskraft [MW]	1,0	4,5 - 5,2
Hastighet [km/t]	500	700
Energiforbruk [kWh/sete/km]	0,12	0,10
Maksimal take-off vekt [kg]	5136	22000 - 27000
Maksimal batterivekt [kg]	688	3470
Maksimal drivstoffvekt [kg]	590	2050
Elektrisk/hybrid rekkevidde, m/batterikapasitet 500 Wh/kg [km]	175/1160	250/1300
Maksimal flyhøyde [moh.]	7620	7620

Tabell 4.1: Data for Zunum ZA10 og ZA50

4.3.1.3 Pipistrel

Slovenske Pipistrel er et firma som de siste årene har produsert mindre fly med elektrisk og hydrogenbasert fremdrift. Avinor kjøpte sommeren 2018 en fullelektrisk 2-seters Pipistrel Alpha Electro som har blitt testet på blant annet lading, batterikapasitet og rekkevidde i det norske klimaet. Firmaet holder for tiden på å utvikle en 19-seter med 400 km rekkevidde som er planlagt å komme på markedet i 2025. [25] Denne modellen vil trolig være meget aktuell for innføringen av elektriske fly på Vestlandet, da den har relativt god kabinkapasitet og rekkevidde.



Bilde 4.10: Fly fra Pipistrel

4.3.1.4 Eviation Alice Commuter

Eviation Aircraft er et israelsk firma som utvikler elektrifiserte fly, og blir omtalt som et av de mest innovative firmaene innenfor transportsektoren for øyeblikket [15]. En av de nyeste flymodellene de holder på å utvikle er Eviation Alice. Dette flyet vil ha en kabinkapasitet på 9 personer, en rekkevidde på over 1000 km og er planlagt å fly sin første tur i løpet av sommeren 2019. Flyet har en batterikapasitet på 900 kWh og drives av tre elektriske motorer på 260 kW hver. Skroget er bygget av et kompositt, men siden det ikke er oppgitt hvilket materiale det er, er det vanskelig å si på om det tåler induksjonslading eller ei [24]. Prisen på flyet og den lave kabinkapasiteten kan dog gjøre at denne flymodellen ikke er den best egnede for drift på Vestlandet. Å måtte fly fire 9-setere for å kunne dekke dagens kabinkapasitet på én 39 seter kan bli vanskelig, både praktisk og økonomisk sett.



Bilde 4.11: Fly fra Eviation Aircraft

4.3.2 Økende flyavganger

Som beskrevet tidligere er det i dag hovedsakelig 39-setere som benyttes på de aktuelle flyvningene, og disse vil sannsynligvis byttes ut med 9- til 19-setere elektriske fly i første omgang. Dette betyr at det i de fleste tilfeller vil en måtte sette inn 2-3 elfly for hvert jet-/propellfly som flyr i dag for å opprettholde dagens kabinkapasitet. Fordi antall fly øker vil man i flere tilfeller måtte lade to eller flere fly samtidig. Dette kan by på problemer ved noen av flyplassene, men skal i de fleste tilfeller være overkommelig med tanke på tilstrekkelig kapasitet på batteribankene og/eller god nok tilførsel fra nettet.

Økning i antall fly vil også skape utfordringer med logistikken, spesielt der pågangen er stor fra før. Ved Flesland, der flyene kommer og går jevnt utover hele dagen, vil man muligens måtte fordele disse avgangene og ankomstene etter når det er mulig å lade. Dette kan dog gjøre ladingen enklere da effekttoppene ikke blir like høye om lasten blir fordelt utover hele dagen.

Økning av antall avganger vil også gå ut over kapasiteten på terminalen. I tillegg vil det være behov for mer flypersonell, men det vil fortsatt være økonomisk gunstig da jetfuel er blant de største utgiftene ved konvensjonell flygning i dag.

Å erstatte et jet-/propellfly med flere elektriske fly vil altså være mulig med de rette tilpasningene av rutelogistikken, og ved å tilrettelegge for gode lademuligheter.

4.4 Flyplasser

Forutenom Bergen lufthavn kjennetegnes de øvrige flyplassene i oppgaven som kortbaneflyplasser med korte rullebaner og relativt korte avstander mellom dem. Tabellen under viser en oversikt over luftlinjeavstanden mellom de fem ulike flyplassene målt i kilometer.

Fra Til	Bergen	Florø	Førde	Sandane	Sogndal
Bergen	x	144.3	126	177.9	142
Florø	144.3	x	44.8	63.6	122.5
Førde	126	44.8	x	52.1	78.1
Sandane	177.9	63.6	52.1	x	92.8
Sogndal	142	122.5	78.1	92.8	x

Tabell 4.2: Luftlinjeavstander mellom flyplassene

For å få dannet et inntrykk av rutelogistikken på de fem flyplassene ble flyvningene i løpet av en gjennomsnittlig uke analysert. Det er kun tatt hensyn til flyvningene til/fra Bergen, Florø, Førde, Sandane og Sogndal. For de fire sistnevnte er alle flyvningene til/fra tatt hensyn til, dette inkluderer også Ørsta/Volda og Oslo i tillegg til de andre nevnt over. For Bergen er det kun flyvningen til/fra de fire øvrige flyplassene som er tatt med. Oversikten er krysskontrollert med flere tilfeldige uker i året for å unngå store avvik. Oversikten over flyvningene er lagt ved som vedlegg 4 – «Flyvninger».

En grønn overgang i flytrafikken vil ikke gå knirkefritt. Selv om prosjektet om elektrifisering av norsk lufttrafikk er helt i startfasen, er det særlig to utfordringer som må tas hensyn til før man kan gå videre.

En av hovedutfordringene med flyvningene til/fra de fem flyplassene er knyttet til svært kort turnaround-tid. Fra flyene lander til det skal være på vei opp i luften igjen er gjennomsnittstiden i dag 15 minutter. Med dagens konvensjonelle drivstoff-fly er dette uproblematisk, men med en overgang til elektriske fly, hvor batteriene må lades opp på svært kort tid ved ankomst, må man tenke nytt.

En annen stor utfordring er nettkapasitet rundt lufthavnene. Området rundt Flesland er i stor vekst og per i dag er det ikke ledig nettkapasitet til lading av fly. [17] Det planlegges å bygge ut nettet i området rundt Flesland, men det meste av effekten er allerede satt av til andre prosjekter, anleggsområder og lignende. [16] Nettet kan bygges ut ytterligere, men det er økonomien som setter et tak her. På Flesland har vi derfor valgt å bruke en annen innfallsvinkel enn på de andre lufthavnene. Istedenfor å kartlegge hvor mye man kan få til med den effekten som er tilgjengelig, skal vi heller undersøke hvor mye effekt som må til for å få Flesland lufthavn til å fungere som en elektrisk hovedflyplass på Vestlandet. En vesentlig forskjell mellom Flesland og de mindre flyplassene er at mengden elektriske avganger på Flesland vil øke de kommende tiårene. I denne rapporten er det som nevnt kun flyvningene til fra/Flesland og de øvrige flyplassene på Vestlandet som er inkludert i beregningene, og det er dermed en rekke andre, lengre innenlandsflyvninger til/fra Flesland som ikke blir tatt hensyn til. Effektbehovet kommer da til å øke drastisk når alle innenlandsflyvningene tas hensyn til, og på grunn av dette er store investeringer i forsyningsnettet rundt Flesland muligens det mest hensiktsmessige. [44] Vi kommer tilbake til dette under kapittel 7 «Diskusjon».

På Sandane er det nylig blitt satt en elektrisk ferge i drift. Anda fergekai ligger veldig nærme Anda Lufthavn og det byr på utfordringer når det kreves store mengder effekt på begge steder. Det er allerede gjort endringer i nettet i forbindelse med elfergen og det er lite kapasitet som kan brukes til lading ved flyplassen. Det er estimert at man kan ta ut litt effekt ved jevn last med mulighet for frakobling. [41]

I Sogndal er det enn så lenge ingen ledig kapasitet ved Haukåsen lufthavn. Dersom man skal kunne lade optimalt ved Haukåsen må nettet bygges ut og eventuelt forsterkes. For å kunne kartlegge mulighetene kreves en analyse fra nettselskapet. Denne analysen ikke gjennomført enda. Hovedberegningene i rapporten er derfor gjort med utgangspunkt i at det ikke er ledig nettkapasitet ved lufthavnen. [42]

Florø lufthavn ligger i nærhet av mye tung industri og nettet er per i dag dimensjonert for å dekke dette. Foreløpig er det mulighet for å kunne ta ut litt effekt for lading ved lufthavnen, men på sikt kreves det nok en utbygging da Florø er en av de flyplassene med mest trafikk blant de små på Vestlandet. [41]

Ved Førde lufthavn, er det planlagt et transformator-bytte for å legge til rette for lading av elbiler ved lufthavnen og i området rundt. Etter denne utskiftningen vil det være en teoretisk mulighet for å ta ut en del effekt. Videre utskiftninger av linjene kan doble det teoretiske effektuttaket ved flyplassen. [43]

4.5 Rutelogistikk og ladetid

4.5.1 "Hub-and-spoke"-modellen

"Hub-and-spoke"-modellen innen luftfarten går ut på at en flyplass som ligger sentralt i et bestemt område brukes som et knutepunkt for omkringliggende flyplasser. For å kunne starte elektrifiseringen av luftfarten på Vestlandet er det flere grunner til å velge et knutepunkt («HUB»), i dette området. Som omtalt i media er muligens Flesland, som er den største flyplassen på Vestlandet, den mest aktuelle flyplassen for en slik "HUB" på Vestlandet. [20][31]

"Får man til en form for satsing i Bergen, vil vi strekke oss langt for å bidra til den utviklingen. Det hadde vært veldig spennende for oss", sier fungerende lufthavndirektør ved Flesland, Øystein Skar (BT 22.03.19). Ved å velge en stor og sentral flyplass vil man enklere kunne sette inn elektriske fly for dagens propellfly da mange av flyene som har rute på kortbanenettet starter eller går via Bergen på ruten sin. [20]

Det finnes også god kompetanse i nærheten. Flere fergesamband langs kysten og ved fjordene har gått over til elektriske ferger ladet av batteribanker som kan levere meget høy effekt. Dette er noe de lokale nettselskapene har vært involvert i og har god kunnskap om. Lokal kompetanse er et godt argument for å benytte Flesland som «HUB». Konsernsjef i BKK, Jannicke Hilland, har tidligere uttalt at "BKK har den nødvendige kompetansen som kreves for å bidra til det elektriske skiftet" [20].

Flesland har også mer oppstillingsplass enn de andre flyplassene i denne oppgaven og vil derfor ha større kapasitet til å lade og drifte de elektrifiserte flyene. Med innføringen av elektriske fly kommer også lavere kabinkapasitet på flyene og muligens noe høyere turnaround-tid for å minske det momentane effektbehovet. Ved valg av en «HUB» er blant annet faktorer som effektivitet og plass viktig, og dette gjør Flesland mye bedre egnet enn de øvrige flyplassene.

Flesland har per i dag ikke god nok effekttilførsel til å kunne drifte elektriske fly. For å kunne brukes som «HUB» trengs det meget høye energimengder, noe som betyr at nettet ved Flesland må bygges ut for å tilfredstille det kommende behovet. En elektrifisering vil altså kreve stor utbygging av nettet lokalt for å kunne levere effekten som trengs. Dette er dog noe som jobbes med politisk av blant annet byrådsleder kandidat Harald Victor Hove, og tidligere Stord-ordfører og medlem av energi- og miljøkomiteen, Liv Kari Eskeland [20].

4.6 Situasjonen per 2019

Per 2019 er man i startfasen av å implementere elektrifiserte passasjerflygninger i norsk luftfart. I tillegg til flere modeller av en- og to-seters elfly med relativt kort rekkevidde, er det også noen eksempler på droner som er store og kraftige nok til å frakte rimelig mye vekt, men som enda ikke har fått godkjenning/driftstillatelse av myndighetene til å frakte mennesker. Det er flere flyselskaper som jobber med å få til større fly, alt fra 9-49 seters fly. Flere av disse har planer om å begynne å testfly prototyper i starten av 2020-tallet og har ønske om å få fly i produksjon i løpet av midten eller mot slutten av 2020-tallet. [1][32]

For øyeblikket er det kun Avinor i Norge som eier et elektrisk fly. Dette er et Pipistrel Alpha Electro, et toseters elektrisk fly som Avinor ønsker å bruke til testing i Norge [9].

Universitetet i Tromsø har også bestilt to fly av samme type som skal benyttes til flygerutdanning, samtidig som de skal brukes til forskning knyttet til fornybar energi [34]. Firmaet OSM Aviation har bestilt 60 elektriske fly som de skal benytte til utdanning av piloter, blant annet skal noen av disse flyene bli brukt på flyskolen på Gullknapp i Arendal [35].

I Norge er det både politisk vilje og vilje i bransjen for å realisere elektriske flyvninger. Norge har særskilte fordeler som gjør at det er spesielt godt egnet her. Kortbanenettet og flyplasser som er plassert relativt nærme hverandre i luftlinje gjør at flyene som er planlagt å komme de nærmeste årene trolig vil kunne fly fullelektrisk mellom flere av lufthavnene. Tilgangen på klimavennlig strøm fra vannkraft og andre fornybare energikilder er også en stor fordel.

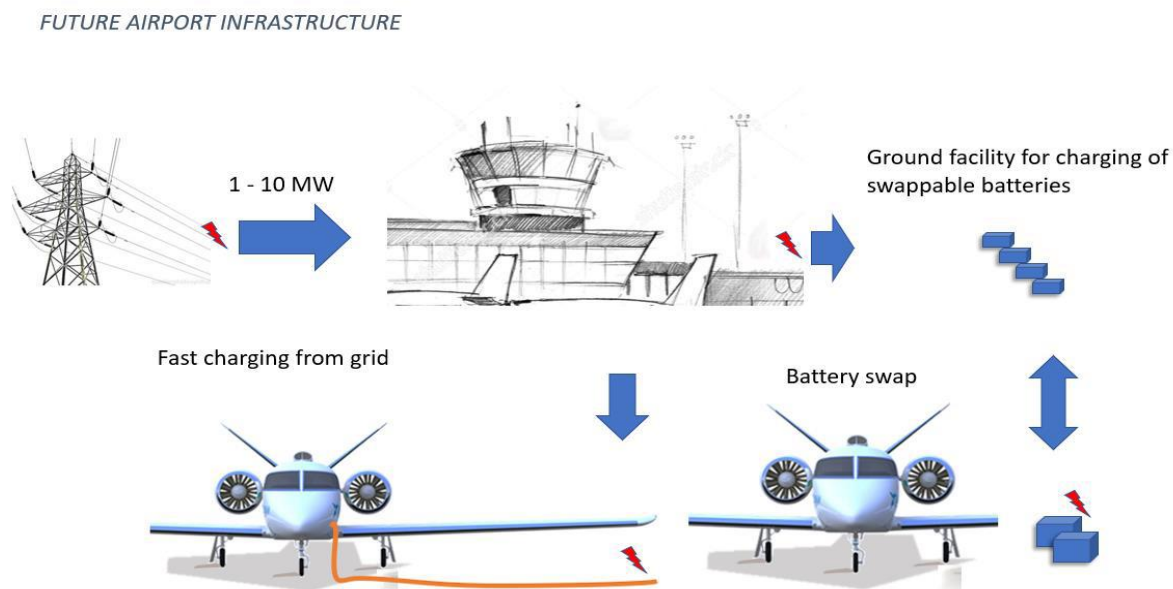
Ettersom de fleste kommersielle flyplassene i Norge er eid av et selskap (Avinor), vil det være enkelt å få til løsninger som vil fungere på flest mulig flyplasser. Det at Norge også har subsidierte flyruter, såkalte FOT-ruter, gir staten muligheten til å stille krav om hvordan disse rutene skal opereres, med mulighet til å legge press på bruk av elektrifiserte fly. De fleste kommersielle lufthavnene i Norge har vist interesse for å være med som pilotprosjekter for elektrifiserte fly. [29][36]

Mange har troen på at man kommer til å se elektrifiserte fly i Norge fremover, og Avinor har en visjon om at den norske innenlandstrafikken skal være elektrifisert innen 2040 [9]. Dette vil kreve store satsinger på batteriteknologi, elektriske motorer, kraftelektronikk, flyproduksjon, ladesystemer, osv., men skal være fullt mulig å få til i praksis.

Dagens situasjon for elektriske fly kan sammenlignes med slik det var med elektriske biler for noen år siden. Det er få aktører som ønsker å satse fordi produktene som foreløpig tilbys ikke er gode nok. Infrastrukturen er heller ikke tilstede fordi det ikke er nok brukere, og produsenter ser ikke etterspørselen i markedet. Skal man komme over i en «Tesla-verden» av elektriske fly må politikerne muligens friste med noen insentiver. Her er en mulig løsning å vise interesse samt muliggjøre utbygging av infrastruktur for lading, slik at flyoperatører ser at det vil være mulig å drifte elektriske fly her i landet. Staten kan også stille krav i anbudene på FOT-rutene som gjør at flyselskaper vil ønske å få elektriske fly inn i flyflåtene sine. Dette vil igjen skape en etterspørsel hos flyprodusenter om å levere elektriske fly.

4.7 Lading

For å få ladet flyene trengs det et ladesystem på flyplassene. Et slik ladesystem skal helst være så universalt som mulig, gjerne med en felles standard som benyttes av alle produsentene. Skal hver flytype ha sin ladeløsning vil det bli dyrt og lite praktisk. Det er forsøkt å undersøke hva de forskjellige flyprodusentene har planlagt å benytte som ladeløsning for sine fly, men denne informasjonen har de ikke vært villige å dele. Det er derfor evaluert tre metoder som anses å være mest gunstige, samt deres fordeler og ulemper.



Bilde 4.12: Lademetoder

4.7.1 Plug-in

Plug-in systemet er det systemet man er mest vant med i dag. Enkelt forklart fungerer det ved at man har en eller flere ladekabler som kobles til det man ønsker å lade. Dette systemet blir i dag benyttet av de fleste elbiler. Utfordringene med dette systemet er at man er avhengig av at pluggene passer overens med kabelen og flyet. Man er også avhengig av at strøm, spenningsnivå, spenningsstype og frekvens er likt. En mulighet er at man har en regulerbar frekvensomformer på flyet som kan ta imot så å si alle typer spenninger og strømmer, men dette vil medføre ekstra vekt i flyet som er svært lite ønskelig. Alternativt kan denne frekvensomformeren stå på bakken på flyplassene.

For å kunne lade batteriene i flyene i løpet av den ønskede turnaround-tiden på 15 min, er det behov for overføring på minst 1 MW for de minste flyene. Verdiene er hentet fra kapittel 5.2 «Beregninger». Dette vil igjen bety at man enten må overføre effekten med høy spenning og lav strøm, eller lav spenning og høy strøm.

Ved bruk av høy spenning og lav strøm kan man benytte relativt tynne kabler, men man er avhengige av at flyene er i stand til å motta høye spenninger. Det vil også kreve sikkerhetsprosedyrer for å sikre mot strømgjennomgang og lysbuer ved til- og frakobling på flyet.

Dersom man velger en løsning med høy strøm og lav spenning reduseres risikoen for lysbuer, og behov og krav til isolasjon minker. For å kunne overføre høye strømmengder er det behov for tykke kabler. Kabelen vil antageligvis veie så mye at en person ikke vil være i stand til å løfte den, og det vil være behov for en automatisk løsning for til- og frakobling. En robotarm vil her være en god løsning. Robotarmen kan styres på forskjellige måter, alt fra kamerastyring til en søkende styring som finner pluggen ved hjelp av sensorer. For å unngå enorme kabelverrsnitt er det mulig å legge opp flere kabler som kobles til flyet parallelt ved flere tilkoblingspunkt. Løsningen man går for er da avhengig av hvilke tilkoblingsmuligheter det er på flyet. For at tilkoblingen skal skje effektivt må bakkepersonell vite hvilke tilkoblingspunkt flyene som lander har, for så å kunne stille inn robotarmene på forhånd. På denne måten kan turnaround-tiden utnyttes maksimalt.

Uavhengig av hvilket alternativ for plug-in lading man velger er automatisering av til- og frakoblingssystemet en klar fordel da risikoen for personskader minimeres, i tillegg til at systemet kan håndtere lange, tunge kabler på en effektiv måte. Om det tas i bruk en løsning med flere tilkoblingskabler, vil det ta lenger tid å koble de til manuelt og det er svært viktig å ikke kaste bort tid på til- og frakobling da det er stor forskjell på å lade i 15 min (ønsket turnaround-tid) kontra for eksempel 13 minutter.

Teknologien for et automatisert tilkoblingssystem finnes og er godt utviklet i dag. Det brukes blant annet i bilproduksjon og for til- og frakobling på elfergene. Det er derfor realistisk å anse at et slikt system også kan utvikles for flyplasser.

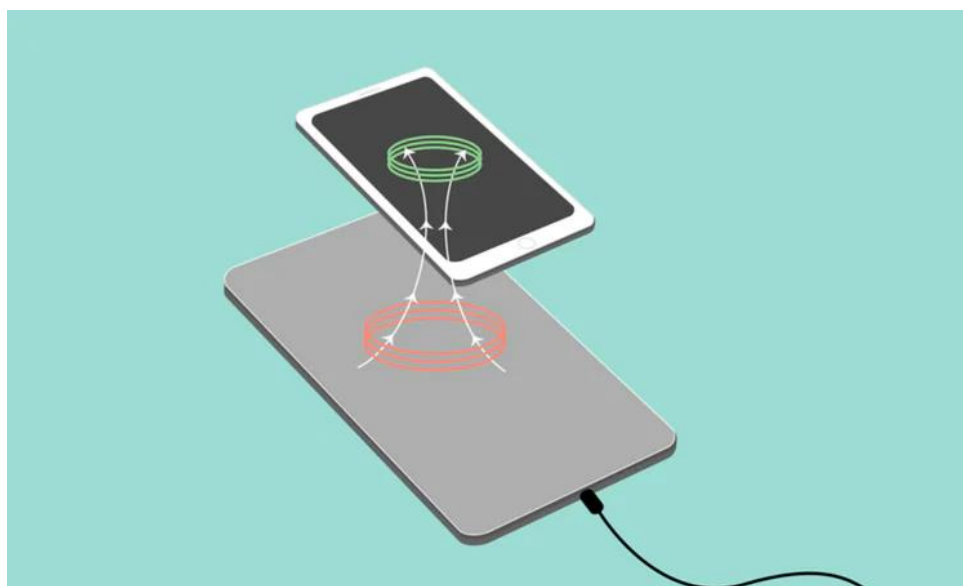
For å få til den automatiske til- og frakoblingen finnes det flere mulige metoder. Et alternativ er at bakkepersonell legger inn den innkommende flytypen i et program, som medfører at det automatiserte systemet vet nøyaktig hvor ladepunktene er. Et annet alternativ er at robotarmen kan være utstyrt med et kamera- og sensorsystem slik at den raskt finner og kobler til ladepunktene. Hovedutfordringen med dette ladesystemet er å få flyprodusentene til å bli enige om en standardisert løsning for plugger, spenninger, strømmer og plassering av tilkoblingspunkter.

4.7.2 Induksjon

Induksjon er for de fleste kjent fra induksjonstopper på kjøkkenet. I dag blir denne teknologien benyttet til blant annet trådløs lading av mobiltelefoner, lading av ferger langs norskekysten og det blir også gjort forsøk på muligheten for å lade elbiler med induksjon. Induksjonsprinsippet er også grunnlaget for virkemåten til generatorer, vekselstrømsmotorer og transformatorer.

Enkelt forklart fungerer induksjon ved at to spoler blir ført mot hverandre. Det sendes en strøm gjennom den ene spolen slik at det oppstår et magnetfelt rundt denne. Om denne strømmen er en vekselstrøm, vil magnetfeltet være varierende. Når en ny spole blir ført inn i det varierende magnetfeltet vil det bli induisert en strøm i denne spolen.

For å oppnå induksjonslading kobles den ene spolen til strømnettet og plassert i en lader med en ladeflate. Den andre spolen ligger i mottakerflaten til gjenstanden som skal lades og er koblet direkte til batteriet. Ved å plassere ladeflaten og mottakerflaten nærme nok hverandre lades mottakeren opp uten at det er fysisk kontakt.



Bilde 4.13: Illustrasjonsbilde av induksjonslading

Fordelen med et induksjonssystem er at man ikke behøver fysisk kontakt i ladepunktet. Dette reduserer faren for mekanisk skade på utstyret og ladingen kan starte opp mye raskere. Man kan se for seg at flyet kan parkere ved gaten der induksjonsanlegget ligger i bakken. Da kan ladingen starte fra det sekundet flyet ruller inn ved gaten, og fordi tiden er kritisk i denne bransjen, vil effektivisering være sterkt ønskelig. Med dagens teknologi kan man uten problem overføre 2,5 MW med induksjon, noe som vil være nok til å blant annet lade Zunum ZA10. [21]

Det er flere utfordringer knyttet til bruk av induksjonslading i flysektoren. En av de større utfordringene er at dagens flykropper (chassis) normalt sett er laget av tynne metallplater av en aluminiumslegering. Dette vil normalt sett ikke tåle magnetfeltet som er nødvendig ved induksjonslading. Problemstillingen kan muligens løses ved å benytte nye komposittmaterialer. Kompositt blir i dag forsket mye på, i hovedsak fordi disse materialene er lettere enn dagens materialer av aluminium.

Virkningsgraden ved induksjonslading er relativt dårlig (i forhold til hva som er vanlig på elektriske anlegg), og ligger normalt på ca. 85-90%. Tapet påvirkes av hvor stort luftgapet mellom ladeflaten og mottakerflaten er. Grunnregelen er; jo mindre avstand mellom flatene, jo bedre er virkningsgraden. Avstanden mellom flyet og ladeflaten bør være 10-15 cm eller mindre [22], men kan være opptil 40-50 cm. [23]

For å oppnå best mulig virkningsgrad er en automatisert løsning for å føre lade- og mottakerflatene mot hverandre et godt alternativ. For lading av ferjer er ladeflaten normalt sett plassert på en robotarm som føres mot mottakerflaten på skipet. Antageligvis kan det benyttes en nokså lik løsning for fly. En annen løsning er å plassere mottakerflaten i buken på flyet og ladeflaten i bakken ved gaten. Deretter har man to alternativ. Den ene muligheten er at flyene kan «knele» mot ladeflaten i bakken. Enkelte transportfly har denne «knele»-funksjonen i dag. Et annet alternativ er at ladeflaten i bakken heves opp til flykroppen og mottakerflaten. Eventuelt kan en ta i bruk en kombinasjon av disse to.



Bilde 4.14: Induksjonslading av elektrisk ferge

En annen utfordring med induksjon er at anlegget veier mye. Induksjonsladingen krever at flyet har en eller flere spoler, samt kraftelektronikken som trengs for å overføre energien. Dette medfører ekstra vekt ombord, i tillegg til at det tar opp plass som ellers kunne blitt benyttet av batterier, passasjerer eller bagasje.

4.7.3 Batteri-swap

Batteri-swap er man vant med fra småelektronikk i dag. Dette systemet fungerer ved at man tar ut brukte batteripakker fra flyet og erstatter disse med fulladede batteripakker. Om vi antar at det til enhver tid er fulladede batteripakker tilgjengelig, begrenses ladingen av flyet kun av hvor raskt en kan bytte batteripakkene. Dette er en klar fordel, da batteripakkene kan lades med jevnt trekk fra nettet uten å være avhengig av å lade i løpet av den korte turnaround-tiden. Ved utskiftning kan de brukte batteripakkene stå igjen på bakken og lade opp mens flyet flyr videre. Denne metoden gjør at en enkelt kan forlenge rekkevidden til eldre fly ved å sette inn nye og bedre batteripakker etterhvert som batteriteknologien forbedres.

Hovedutfordringen med denne lademetoden er at man behøver en felles standard for batteripakkene. Det er også begrenset hvor batteripakkene kan plasseres på flyet, og uavhengig av plassering vil batteripakkene ta opp plass. Flyplassen må også utstyres med et større anlegg for å kunne lade, håndtere og bytte batteripakkene.

Utformingen av et batteri-swap anlegg avhenger av hvordan batteripakkene er konstruert, og hvor de er plassert på flyet. En mulighet er et undergrunnsanlegg i bakken der batteripakkene blir plukket ut fra buken eller vingene av et stasjonært anlegg. Gitt at det er mulig å bygge et slikt undergrunnsanlegg, forutsettes det at batteripakkene er plassert på undersiden av flyet, og at flyet parkerer på nøyaktig samme plass hver gang. Dersom batteripakkene er plassert på oversiden av flyet vil det være mulig å bytte ut batteripakkene ved å ta i bruk en form for heisekran-løsning. En slik løsning vil gi større fleksibilitet enn et stasjonært undergrunnsanlegg.

En tredje løsning kan være å lage et kjøretøy som kan foreta bytte av batteripakkene uavhengig om batteripakkene er montert på undersiden eller oversiden av flyet. Kjøretøyet må være smidig nok til å komme seg under flyet for utbytting, men må også ha en påmontert kran for å ha muligheten til utbytting på oversiden. Av de tre nevnte løsningene er det trolig denne som gir mest fleksibilitet, men som antageligvis også krever mest menneskelig styring og dermed er det størst risiko for menneskelig svikt ved denne løsningen.

En mulig utfordring ved bruk av denne lademetoden er å sørge for at det er god nok kontakt i ladepunktene mellom flyene og batteripakkene, i tillegg til tilstrekkelig kjøling for å unngå varmgang. Det er også viktig at batteripakkene plasseres lett tilgjengelig, men at de samtidig er plassert på en trygg og hensiktsmessig måte, både med tanke på vekt og plassbesparelse.

4.7.4 Konklusjon lading

Uavhengig av lademetode er det behov for en felles standard. En slik standard finnes ikke i dag. Flyprodusentene ønsker ei heller å fortelle hvilke lademetoder, spenningsnivå, spenningstyper eller frekvens de kommer til å benytte, noe som gjør at det er vanskelig å forutsette hvilken metode som er mest hensiktsmessig og aktuell.

Uansett hvilket ladesystem som tas i bruk, eventuelt en kombinasjon av flere, kan det antas at det blir behov for utbygging av et automatisert anlegg ved gatene der de elektriske flyene skal lade. En slik utbygging må gjøres i samarbeid med de selskapene som skal benytte gatene slik at man får et korrekt ladesystem i forhold til flyene de opererer.

5 Data og databehandling

5.1 Forutsetninger for databehandling

Fordi oppgavens tema er fremtidsrettet finnes ikke all teknologien som skal til for å realisere elektrifisering av lufttrafikken i Norge i dag. En annen utfordring har vært at selskaper som utvikler teknologien til de elektriske flyene holder kortene tett til brystet og har ikke ønsket å oppgi den informasjonen som hadde vært nødvendig for å gi komplette og godt beregnede forslag på løsninger. Dette har medført at det er tatt en del forutsetninger og betraktninger uten å kunne få disse bekreftet fra produsentene. De forutsetningene som er tatt, er gjort i samråd med Avinor, samt ut fra opplysninger vi har fått fra andre kilder. Beregningene er gjort med bakgrunn i opplysninger og verdier som er oppgitt i Avinor sin rapport "Introduction of Electric Aircraft in Norway". [1]

De eneste tekniske dataene vi har fått på elektriske fly er på Zunum sitt ZA10 og ZA50 [1]. Det er derfor disse tallene som lagt til grunn i våre beregninger. Verdiene er brukt i ulike beregninger, deriblant størrelsen på batteriene ombord i flyene og dens nødvendige C-rate.

ZA10:

$$\text{Kabinkapasitet} \times \text{Energiforbruk} \times \text{Rekkevidde} = \text{Batterikapasitet}$$

$$12 \text{ Seter} \times 0,12 \text{ kWh/sest/km} \times 175 \text{ km} = \mathbf{252 \text{ kWh}}$$

$$C = \text{Motorstørrelse} / \text{Batterikapasitet} = 1 \text{ MW} / 252 \text{ kWh} = \mathbf{3,97 \text{ C}}$$

$$\text{Energitetthet} = \text{Batteribank} / \text{Vekt} = 252 \text{ kWh} / 688 \text{ kg} = \mathbf{366,3 \text{ Wh/kg}}$$

ZA50:

$$\text{Kabinkapasitet} \times \text{Energiforbruk} \times \text{Rekkevidde} = \text{Batterikapasitet}$$

$$48 \text{ seter} \times 0,1 \text{ kWh/sest/km} \times 250 \text{ km} = \mathbf{1200 \text{ kWh}}$$

$$C = \text{Motorstørrelse} / \text{Batterikapasitet} = 4,5 \text{ MW} / 1200 \text{ kWh} = \mathbf{4,33 \text{ C}}$$

$$\text{Energitetthet} = \text{Batteribank} / \text{Vekt} = 1200 \text{ kWh} / 3470 \text{ kg} = \mathbf{345,82 \text{ Wh/kg}}$$

Med bakgrunn i beregningene over har vi antatt at batteriene i flyet vil måtte ha en C-rating på 4-5 C, en energikapasitet på 252 kWh og 1200 kWh og en energitetthet mellom 350 Wh/kg og 500 Wh/kg for hhv. ZA10 og ZA50. Batterier med disse egenskapene finnes allerede, dog ikke i kommersiell produksjon. [19][3] Det vil være mulig å redusere C-ratingen ved å øke totaleffekten på batteribanken eller forlenge tiden flyene lader. Dette vil også gjelde motsatt vei. Vi har antatt at batteriene kan lades opp like raskt som de lades ut.

Det er hentet opplysninger fra Avinor sine ruteplaner for å finne ut når og hvor mange fly som letter og lander fra de aktuelle flyplassene. Med bakgrunn i disse opplysningene er det også funnet informasjon om hvor lenge hvert enkelt fly står på bakken, såkalt turnaround-tid. Det er antatt at turnaround-tiden kan benyttes fullt ut til lading. Dette har også gitt en indikator på når flyplassen er i drift. Disse faktorene varierer fra flyplass til flyplass og de er essensielle i valg av størrelse på en eventuell batteribank. Beregningene er gjort ut ifra dagens ruteplan, selv om de sannsynligvis vil endre seg i forbindelse med elektrifiseringen. I fremtidig arbeid bør rutene revurderes, men per i dag kreves det for store logistikkmessige endringer for at vi skal kunne ta hensyn til det.

I dialog med de aktuelle nettselskapene har de gitt oss et anslag på hvor mye nettkapasitet som er tilgjengelig for lading av fly. Selv om utbygging av nettet er sannsynlig, er det verdiene fra nettselskapene vi har valgt å bruke som utgangspunkt i våre beregninger. Tallene er anslagsvise, så her bør det foretas mer nøyaktige beregninger fra nettselskapene sin side før mer konkret arbeid påbegynnes. Vi har ikke fått opplysninger på om det er mer ledig nettkapasitet på noen tidspunkter i løpet av døgnet (typisk natt) som kan brukes til å lade opp en batteribank, for deretter å bruke dette til å drifte på dagtid. Dette er noe som bør ses nærmere på ved en eventuell utbygging.

Flyplass	Tilgjengelig kapasitet [kW]	Mulig kapasitet [kW]
Bergen lufthavn, Flesland	-	-
Florø lufthavn	500	-
Førde lufthavn, Bringeland	1000	1800
Sandane lufthavn, Anda	300	-
Sogndal lufthavn, Haukåsen	-	-

Tabell 3.1: Tilgjengelig effekt i nettet

Vi har forutsatt at når flyene kommer til en flyplass må de fullades fra null. Dette er lite sannsynlig, da kravene tilsier at flyene skal ha nok rekkevidde til å kunne fly til en annen flyplass ved feil på destinasjonsflyplassen, eventuelt sirke rundt i påvente av klarsignal for landing. Det reelle ladebehovet er derfor lavere i praksis enn beregningene tilsier.

Ingen av flyprodusentene har gitt fra seg informasjon om regenerering ved landing, og derfor er det ikke regnet med at flyene får regenerert energi under innflyvningen. Dersom det viser seg at flyene får regenerert effekt inn på batteriene under innflyvningen resulterer det i et mindre ladebehov.

Dersom flyet ikke rekker frem til destinasjon helelektrisk er det antatt at APU blir tatt i bruk som rekkeviddeforlenger.

5.2 Beregninger

Dagens flygninger til og fra de aktuelle flyplassene blir operert av Widerøe sine Dash-8-100 fly med kabinkapasitet på 39 seter. Om flygningene skal erstattes med for eksempel 12-seteren Zunum ZA10, må antall flyvninger økes for å oppnå samme kabinkapasitet.

For hver av lufthavnene er det beregnet å lade fra 5 og opp til 30 fly per døgn. Dette spranget er valgt for å se differansen i effektbehov ved forskjellige antall flygninger. Prisen på batteribankene er en viktig faktor for hva som er en god vurdering, men det er ikke tatt stilling til i dette tilfellet da batteribankleverandørene vi har vært i kontakt med ikke har vært villige til å gi et prisestimat. Det understrekes at løsningene og konklusjonene i oppgaven må anses som forslag.

I beregningene er det også sett på muligheten for å bytte ut alle dagens flyvninger med Zunum sitt ZA50 med kabinkapasitet på 48 seter. Dette flyet vil ikke bli realisert før en god stund frem i tid. Det er likevel besluttet å ta det med i beregningene da det vil gi en oversikt over effektforbruket i løpet av et døgn uten å måtte endre dagens ruteplan.

For å beregne hvor mange elektriske fly som er nødvendig for å erstatte dagens flyvninger har vi gjort noen antagelser. Det er antatt at det i gjennomsnitt benyttes 50% av kabinkapasiteten på flyvninger på Vestlandet. Årsaken til dette er at man på disse reiserutene har muligheten til å benytte seg av andre transportmidler, deriblant bil, buss og ferje/hurtigbåt. På rutene fra Vestlandet til Oslo antar vi at gjennomsnittet ligger på 75% da man på dette strekket ikke har samme muligheten til å benytte alternative transportmidler.

Det er utviklet flere regneark for å foreta beregningene, disse ligger i vedlegg 1 – «Generell beregning» og vedlegg 2 – «Spesifikk beregning», med brukerforklaring i vedlegg 3 – «Brukerforklaring». Vedlegg 1 og vedlegg 2 brukes til effektberegningene. Regnearkene er laget så universale som mulig slik at man enkelt skal kunne endre verdier. Dette vil gjøre det enklere for andre å endre verdier for å få mer korrekte beregninger, når mer nøyaktige tall legges frem.

Vedlegg 1 – «Generell beregning», brukes til å beregne hvor stor batteribank som er nødvendig avhengig av hvor mye effekt som er tilgjengelig, antall elektriske fly i drift og hvor mange fly som skal lade samtidig på den aktuelle flyplassen. I dette regnearket kan man også legge inn hvor lenge flyene lader og hvor stor del av døgnet flyplassen er aktiv. Dette er faktorer som påvirker effektbehovet. Her er det mulighet for å legge inn selvvalgte verdier under alle punkt, noe som åpner for at man enkelt kan beregne behovet i mange scenarioer under egne forutsetninger.

Vedlegg 2 – «Spesifikk beregning», gir en mer nøyaktig beregning av hver enkelt flyplass. Her fyller man inn nøyaktig når flyene kommer og går, hvor langt de har flydd og hvor mye strøm de har brukt. Dette gjør at man får en mer nøyaktig oversikt over effektforbruket i løpet av et døgn. For å gjennomføre denne beregningen må man ha en konkret ruteplan for å fylle inn alle faktorene. Det er verdt å merke seg at vedlegg 2 ikke gir muligheten til å legge inn sikkerhetsmarginer i form av flere flyvninger og hvor mange fly som skal lades samtidig.

Det er beregnet batteribank for hver flyplass som er basert på tilgjengelig nettkapasitet og antall fly som skal lades. Grunnen til at det er lagt så stor vekt på batteribanker er at de muliggjør et jevnt trekk fra nett slik at store effektpeaker unngås. Bruken av batteribanker er diskutert under de aktuelle flyplassene i kapittel 6. Energibehovet vil være det samme med eller uten batteribank, men vil redusere behovet for utbygging av nettet.

5.2.1 Bergen

BKK har informert om at det foreløpig ikke er tilgjengelig effekt i nettet som kan benyttes til lading av elektriske fly. Siden det ikke er tilgjengelig effekt har vi tatt utgangspunkt i effektbehovet i stedet for hva nettet kan levere.

5.2.1.1 Erstatning av dagens kabinkapasitet

Ifølge Avinor sine oversikter er det ni flyvninger fra Bergen lufthavn Flesland til de øvrige flyplassene på Vestlandet. Tabellen under viser en oversikt over alle verdiene.

	Antall fly i snitt (per dag)	Antall seter (per år)	Antall brukte seter (per år)	Antall elektriske fly som trengs (19-seters)	Antall elektriske fly som trengs (12-seters)	Antall elektriske fly som trengs (9-seters)
Sogndal	2	24336	12168	2,05	3,25	4,33
Førde	1	12168	9126	1,54	2,44	3,25
Ørsta/ Volda	1	12168	9126	1,54	2,44	3,25
Sandane	0	0	0	0,00	0,00	0,00
Florø	5	50700	25350	5,13	8,13	9,03
Totalt	9	99372	55770	10,26	16,25	19,86
Avrundet	9			11	17	20

Tabell 5.1: Fly, Bergen

I tabellen under beregnes effektbehovet for utskiftning av dagens kabinkapasitet med Zunum sine ZA10 og ZA50.

17 stk 12- seters Zunum ZA10	9 stk 48-seters Zunum ZA50
$252 \text{ kWh} \times 17 \text{ stk} = \mathbf{4284 \text{ kWh}}$	$1200 \text{ kWh} \times 9 \text{ stk} = \mathbf{10800 \text{ kWh}}$
$4284 \text{ kWh} / 24 \text{ h} = \mathbf{178,5 \text{ kW}}$	$10800 \text{ kWh} / 24 \text{ h} = \mathbf{450 \text{ kW}}$

Tabell 5.2: Effektbehov, Bergen

Om man bare ser på flygningene til/fra Bergen fra de øvrige aktuelle flyplassene ankommer første fly Bergen lufthavn kl. 07:05 og siste flyr går kl. 20:10. Dette betyr at det er 10 timer og 55 minutter i løpet av kvelden/natten der det ikke lander fly fra de andre aktuelle flyplassene. Dersom disse 17 stk ZA10 eller 9 stk ZA50 skal bli implementert i ruteplanen må det lande henholdsvis $1,30 \approx 2$ stk ZA10 eller $0,63 \approx 1$ stk ZA50 i timen, i løpet av de timene flyplassen har aktivitet.

Størrelsen på en eventuell batteribank kan variere noe, men for å kunne levere nok effekt til 17 stk ZA10 må det bli tilført 178,5 kW jevnt fra nettet hele døgnet. Eventuelt kan det tilføres 4284 kWh i løpet av natten når det er lite aktivitet. Får man 178,5 kW i timen er en batteribank på 2000 kWh med en C-rating på omtrent 1C tilstrekkelig. Om batteribanken skal lades opp på natten, må batteribanken være på minst 4284 kWh og 1C (vedlegg 1).

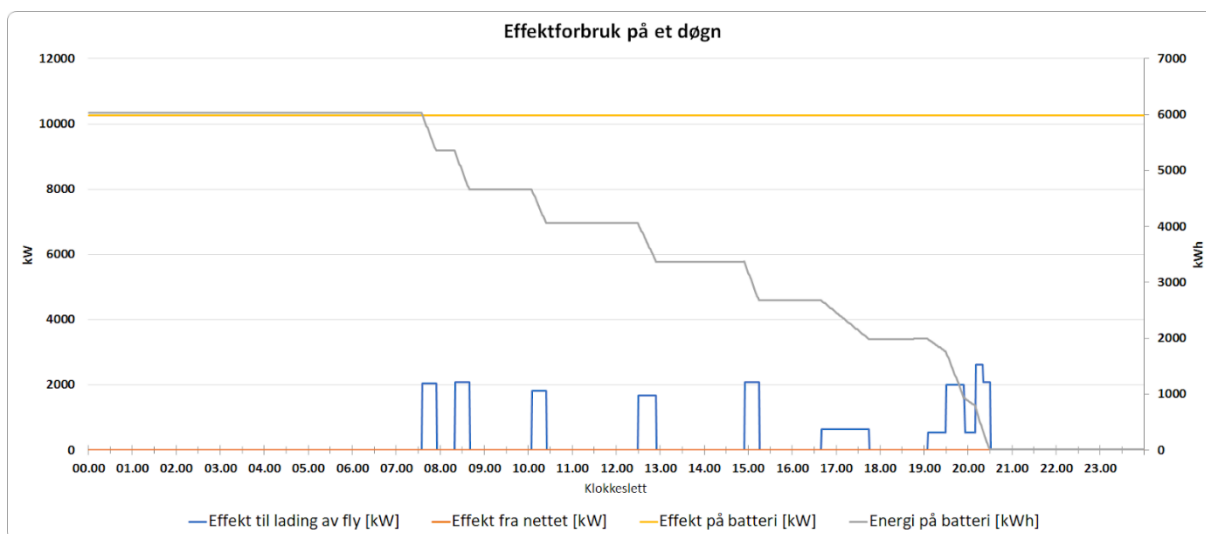
Med utgangspunkt i 9 stk ZA50 vil batteribanken avhenge av om man får 450kW jevnt fra nettet hele døgnet eller 10800 kWh i løpet av natten når det er lite aktivitet. Får man 450 kW i timen er en batteribank på 2400 kWh med en C-rating på 2C tilstrekkelig. Ved opplading kun på natten trengs en batteribank på minst 10800 kWh og 1C (vedlegg 1).

Flytype	Antall fly	Batteribank	C-Rating
Zunum ZA10	17 stk	2000 kWh	1 C
Zunum ZA10*	17 stk	4284 kWh	1 C
Zunum ZA50	9 stk	2400 kWh	2 C
Zunum ZA50*	9 stk	10800 kWh	1 C

Tabell 5.3: Maks utnyttelse, Bergen. *Kun lading på natten. Se vedlegg 1

5.2.1.2 Sette inn ZA50 i dagens rutetabell

Dersom alle dagens flygninger byttes ut med ZA50 fly vil energiforbruket i løpet av et døgn se ut som i figur 5.4.



Figur 5.4: Effektforbruket i løpet av et døgn på Bergen lufthavn. Se vedlegg 2

Kalkylen i vedlegg 2 beregner en batteribank på 6036 kWh og en C-rating på 1,7C. Man ser at denne kalkylen gir en mindre batteribank enn hva beregningen i vedlegg 1 gir. Dette skyldes at det har blitt tatt hensyn til at flyene flyr kortere enn hva de har i elektrisk rekkevidde, noe som vil si at flyene ikke trenger å lade opp batteriene fra 0 som er antatt i vedlegg 1. Det at flyene i denne analysen lader lengre enn hva som er lagt til grunn i vedlegg 1, påvirker resultatet.

5.2.2 Florø

SFE har estimert 500 kW tilgjengelig effekt i nettet som kan benyttes til lading av elektriske fly. Dette utgjør 12 MWh i døgnet. Det tas utgangspunkt i et elektrisk fly som har et batteri på 252 kWh (Zunum ZA10) eller 1200 kWh (Zunum ZA50), som må fullades fra 0 kWh hver gang flyet lander.

5.2.2.1 Erstatning av dagens kabinkapasitet

I dag er det 10 flyvninger i døgnet mellom de aktuelle lufthavnene og Florø. Se oversikt under.

	Antall fly i snitt (per dag)	Antall seter i dag (per år)	Antall brukte seter (per år)	Antall elektriske fly som trengs per dag (19-seters)	Antall elektriske fly som trengs per dag (12-seters)	Antall elektriske fly som trengs per dag (9-seters)
Bergen	5	60840	30420	5,13	8,13	10,83
Oslo	4	48672	36504	6,16	9,75	13
Førde	1	14196	10647	1,54	3,41	3,79
Totalt	10	123708	77571	12,83	21,29	27,63
Avrundet	10			13	22	28

Tabell 5.4: Fly, Florø

5.2.2.2 Utbygging av enkelte flyvninger

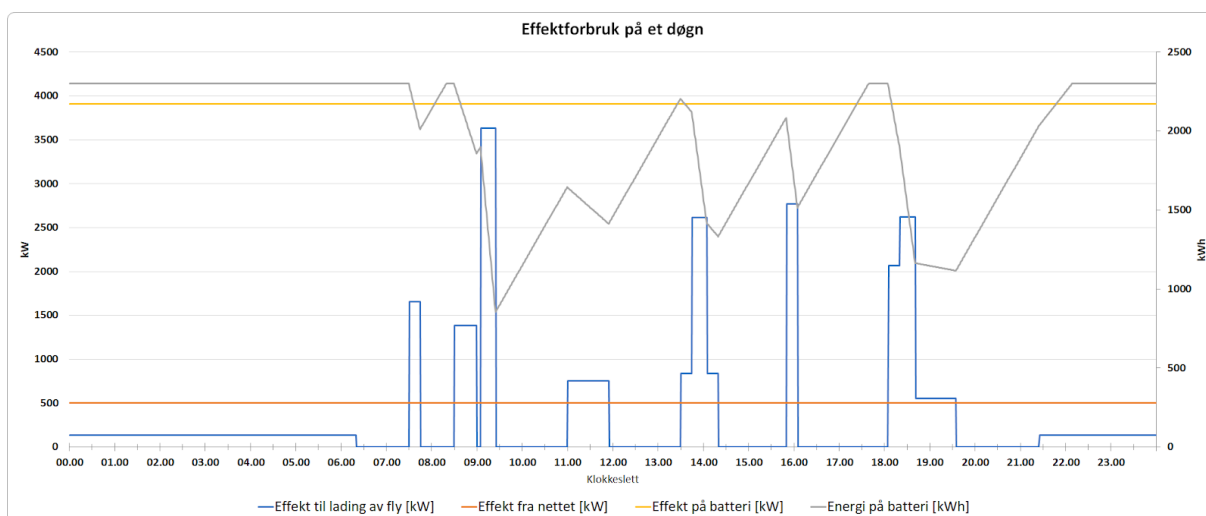
Størrelsen på en eventuell batteribank avhenger av hvor mange fly som skal lades i løpet av en dag og hvor mange av disse som skal lade samtidig. Tabell 5.5 gir en oversikt over hvor stor en eventuell batteribank må dimensjoneres ved lading av ulike antall ZA10. Dersom det lander flere enn 20 fly per døgn, må det lades mer enn ett i timen.

Man kan se i tabell 5.5 at størrelsen på batteribanken avhenger hovedsakelig av hvor mange fly som må lade samtidig. Dette er fordi batteribanken lades kontinuerlig, og så lenge flygningene er fordelt utover hele dagen, så vil batteribanken lades opp tilstrekkelig mellom hver utlading. Tabell 5.5 forutsetter ZA10-fly.

Fly som lader samtidig Fly i døgnet	1	2	3	4	5
5	0,6 MWh 1,68 C	1 MWh 2,02 C	2 MWh 1,51 C	2 MWh 2,02 C	3 MWh 1,68 C
10	0,6 MWh 1,68 C	1 MWh 2,02 C	2 MWh 1,51 C	2 MWh 2,02 C	3 MWh 1,68 C
15	0,6 MWh 1,68 C	1 MWh 2,02 C	2 MWh 1,51 C	2 MWh 2,02 C	3 MWh 1,68 C
20	—	1 MWh 2,02 C	2 MWh 1,51 C	2 MWh 2,02 C	3 MWh 1,68 C
25	—	1 MWh 2,02 C	2 MWh 1,51 C	2 MWh 2,02 C	3 MWh 1,68 C
30	—	1 MWh 2,02 C	2 MWh 1,51 C	2 MWh 2,02 C	3 MWh 1,68 C

Tabell 5.5: Tabell for utbygging av antall fly i Florø. Se vedlegg 1

5.2.2.3 Sette inn ZA50 i dagens rutetabell



Figur 5.5: Effektforbruket i løpet av et døgn på Florø lufthavn. Se vedlegg 2

Figur 5.5 er en visualisering av effektbehovet ved Florø lufthavn. I beregningene som ligger til grunn for figur 5.5, ble resultatet at en batteribank på 2,2 MWh og 1,7C er tilstrekkelig. Denne grafen resulterer i en mindre batteribank enn hva tabell 5.6 (under) viser. Dette fordi beregningen i vedlegg 2 tar utgangspunkt i dagens ruteplan og avstanden flyene har flydd. Disse reelle verdiene inkluderer at flyene ikke utlades helt, og derfor trenger mindre energi når de skal lade ved turnaround. I tillegg har enkelte fly i ruteplanen lengre turnaround enn 15 min, noe som påvirker effektbehovet.

5.2.2.4 Maks utnyttelse av flyplassen

Florø lufthavn kan maksimalt lade $47,6 \approx 47$ stk 12-seters fly eller 10 stk 48-seters fly i døgnet.

$$500 \text{ kW} \times 24\text{h} = \mathbf{1200 \text{ kWh}}$$

$$\mathbf{ZA10: } 1200 \text{ kWh} / 252 \text{ kWh} = \mathbf{47,6 \text{ stk}}$$

$$\mathbf{ZA50: } 12000 \text{ kWh} / 1200 \text{ kWh} = \mathbf{10 \text{ stk}}$$

I dag ankommer siste fly Florø lufthavn kl. 21:25 og første fly går kl. 06:20 neste dag. Dette betyr at det er 8 timer og 55 minutter der flyplassen ikke har aktivitet. Dersom dagens kabinkapasitet skal dekkes må det i snitt lande $3,12 \approx 4$ stk ZA10 eller $0,66 \approx 1$ stk ZA50 i timen, i de timene flyplassen har aktivitet. Det er da behov for en batteribank på 4500 kWh med en C-rating på ca. 1 C, forutsatt at flyene bruker 15 min på å lade opp batteriene (vedlegg 1).

Flytype	Antall fly	Batteribank	C-Rating
Zunum ZA10	47 stk	4500 kWh	1 C
Zunum ZA50	10 stk	4500 kWh	1,1 C

Tabell 5.6: Maks utnyttelse, Florø

5.2.3 Førde

Ifølge Sunnfjord energi er det 1000 kW tilgjengelig i nettet som kan benyttes til lading av elektriske fly på Bringeland lufthavn. Dette utgjør 24 MWh i døgnet. Beregningene tar utgangspunkt i et elektrisk fly med en batterikapasitet på 252 kWh (Zunum ZA10) eller 1200 kWh (Zunum ZA50), som må fullades fra 0 kWh hver gang flyet lander.

5.2.3.1 Erstatning av dagens kabinkapasitet

Avinor sine oversikter viser at Førde lufthavn Bringeland har en flytrafikk på syv flyvninger i døgnet. Se oversikten under.

	Antall fly i snitt (per dag)	Antall seter i dag (per år)	Antall brukte seter (per år)	Antall elektriske fly som trengs per dag (19-seters)	Antall elektriske fly som trengs per dag (12-seter)	Antall elektriske fly som trengs per dag (9-seters)
Bergen	2	24336	12168	2,05	3,25	4,33
Oslo	5	60840	45630	7,70	12,19	16,25
Totalt	7	85176	57798	9,75	15,44	20,58
Avrundet	7	-	-	10	16	21

Tabell 5.7: Fly, Førde

5.2.3.2 Utbygging av enkelte flyvninger

Avhengig av om man kun ønsker å bytte ut noen av flyvningene til elektriske fly kan man bruke en mindre batteribank. Man kan se i tabell 5.8 at det er størrelsen på batteribanken avhenger hovedsakelig av hvor mange fly som må lade samtidig. Dette er fordi batteribanken lades kontinuerlig, og så lenge flyvningene er fordelt utover hele dagen, så vil batteribanken lades opp tilstrekkelig mellom hver utladning.

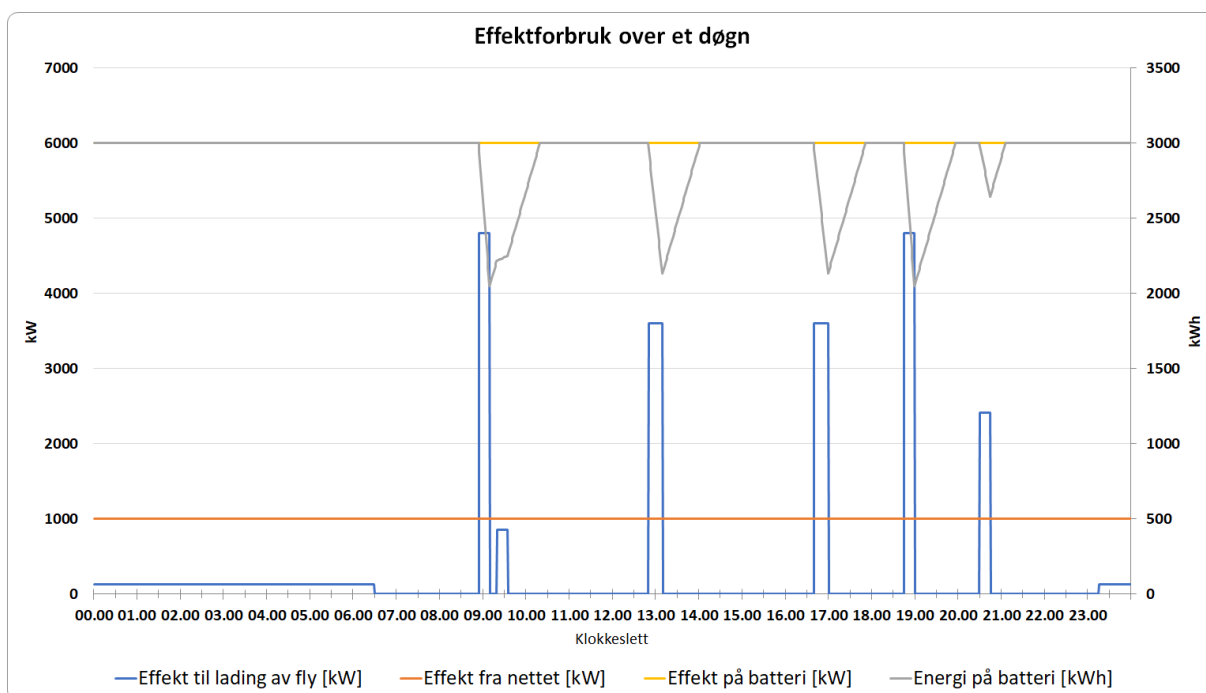
Fly som lader samtidig Fly i døgnet	1	2	3	4	5
5	0	1 MWh 2,02C	2 MWh 1,51C	2 MWh 2,02C	3 MWh 1,68C
10	0	1 MWh 2,02C	2 MWh 1,51C	2 MWh 2,02C	3 MWh 1,68C
15	0	1 MWh 2,02C	2 MWh 1,51C	2 MWh 2,02C	3 MWh 1,68C
20	—	1 MWh 2,02C	2 MWh 1,51C	2 MWh 2,02C	3 MWh 1,68C
25	—	1 MWh 2,02C	2 MWh 1,51C	2 MWh 2,02C	3 MWh 1,68C
30	—	1 MWh 2,02C	2 MWh 1,51C	2 MWh 2,02C	3 MWh 1,68C

Tabell 5.8: Tabell for utbytting av antall fly i Førde. Se vedlegg 1

I tabell 5.8 er det forutsatt ZA10-fly. Siste flyet kommer kl. 23:15 og første flyr går kl. 06:30 som i dag. Dersom flytrafikken økes til mer enn 20 fly i døgnet, må flere enn et fly lade samtidig.

5.2.3.3 Sette inn ZA50 i dagens rutetabell

Ser vi på utbygting av alle dagens fly til ZA50 kan vi sette opp en kalkyle av energiforbruket i løpet av et døgn.



Figur 5.6: Effektforbruk i løpet av et døgn på Førde lufthavn. Se vedlegg 2

Ut ifra kalkylen i vedlegg 2 er det beregnet en batteribank på 3 MWh og 2C for Førde lufthavn, Bringeland. Denne kalkylen gir en mindre batteribank enn i tabell 5.9 (under), da det i vedlegg 1 beregnes hvor mange elfly Bringeland lufthavn maksimalt kan lade i løpet av et døgn. Vedlegg 2 derimot, er beregnet etter dagens flyvninger, noe som gir en mer skreddersydd analyse av den enkelte flyplassen. I beregningene som ligger til grunn for figur 5.6, er de reelle turnaround-tidene i dagens ruteplan lagt inn, noe som spiller inn på effektbehovet. Ved å forlenge ladetiden, går det momentane effektbehovet ned.

5.2.3.4 Maks utnyttelse av flyplassen

Førde lufthavn kan maksimalt ta imot og lade opp 95,24 \approx 95 stk ZA10 eller 20 stk ZA50 i døgnet. Disse verdiene er urimelig høye, da det aldri vil være et så stort behov.

$$1000 \text{ kW} \times 24 \text{ h} = \mathbf{24000 \text{ kWh}}$$

$$\mathbf{ZA10: 24000 \text{ kWh} / 252 \text{ kWh} = 95,24 \text{ stk}}$$

$$\mathbf{ZA50: 24000 \text{ kWh} / 1200 \text{ kWh} = 20 \text{ stk}}$$

I dag ankommer siste fly Førde lufthavn kl. 23:15 og første flyr går kl. 06:30 neste dag. Dette betyr at det er 7 timer og 15 minutter der flyplassen ikke har aktivitet. Dersom flyplassen skal utnyttes maksimalt kan teoretisk sett 5,69 \approx 6 stk ZA10 eller 1,19 \approx 2 stk ZA50 fullades per time, de timene flyplassen har aktivitet. Det er da behov for en batteribank på 7190 kWh \approx 7200 kWh med en C-rating på 0,84C \approx 1C for ZA10 fly. Behovet for batterikapasitet med ZA50 fly er 4800 kWh og 2C, forutsatt at flyene fullades på 15 min. (vedlegg 1 - "Generell beregning")

Flytype	Antall fly	Batteribank	C-Rating
Zunum ZA10	95 stk	7200 kWh	1 C
Zunum ZA50	20 stk	4800 kWh	2 C

Tabell 5.9: Maks utnyttelse, Førde

5.2.4 Sandane

SFE har anslått at det er 300 kW tilgjengelig i nettet som kan benyttes til lading av elektriske fly. Dette utgjør 7,2 MWh i døgnet.

5.2.4.1 Erstatning av dagens kabinkapasitet

Ifølge Avinors oversikter over flyvninger til og fra Sandane lufthavn Anda, ser man at det forekommer 4 flyvninger i døgnet. Av disse går 2 flyvninger til Sogndal og 2 flyvninger til Oslo. Se oversikten under.

	Antall fly i snitt (per dag)	Antall seter i dag (per år)	Antall brukte seter (per år)	Antall elektriske fly som trengs per dag (19-seters)	Antall elektriske fly som trengs per dag (12-seters)	Antall elektriske fly som trengs per dag (9-seters)
Bergen	0	0	0	0	0	0
Oslo	2	24336	18252	3,08	4,88	6,5
Sogndal	2	24336	18252	3,08	4,88	6,5
Totalt	4	48672	36504	6,16	9,75	13
Avrundet	4			6	10	13

Tabell 5.10: Fly, Sandane

5.2.4.2 Utbygging av enkelte flyvinger

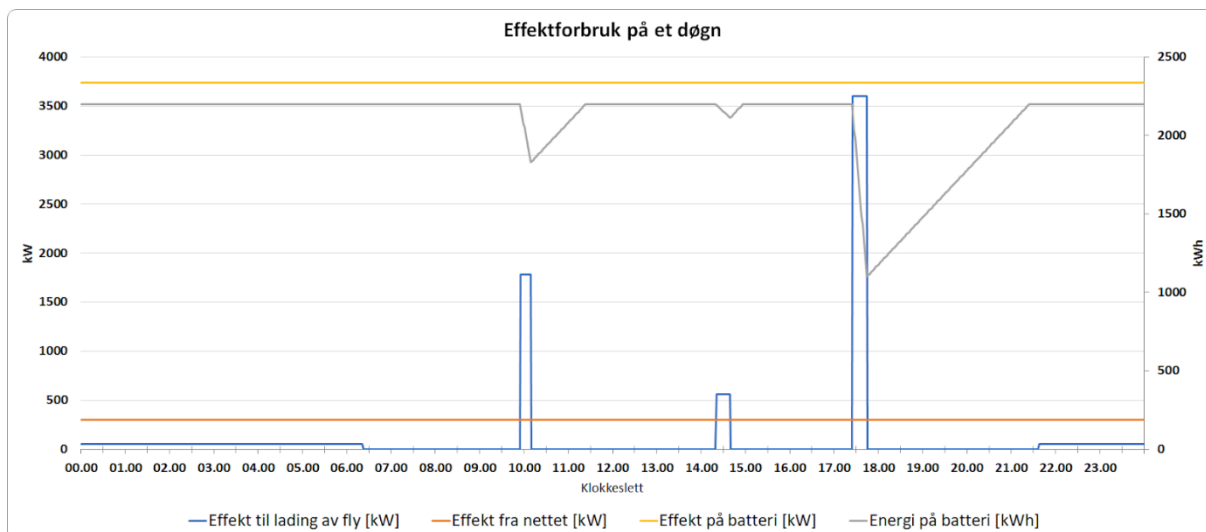
Dersom det kun byttes ut noen av flyvningene til elektriske fly, vil behovet for batterikapasitet være mindre. For beregningen er det forutsatt ZA10 fly, at siste flyet kommer kl. 21:37, og at første flyr går kl. 06:22. Skal mer enn 20 fly lette og lande per døgn må noen av de lade samtidig. Sandane har ikke kapasitet til å lade mer enn 28 fly i døgnet. Man kan se i tabell 5.11 at størrelsen på batteribanken avhenger hovedsakelig av hvor mange fly som må lade samtidig. Dette er fordi batteribanken lades kontinuerlig, og så lenge flygningene er fordelt utover hele dagen, så vil batteribanken lades opp tilstrekkelig mellom hver utlading.

Fly som lader samtidig Fly i døgnet	1	2	3	4	5
5	0,6 MWh 1,68C	1 MWh 2,02C	2 MWh 1,51C	2 MWh 2,02C	3 MWh 1,68C
10	0,6 MWh 1,68C	1 MWh 2,02C	2 MWh 1,51C	2 MWh 2,02C	3 MWh 1,68C
15	0,6 MWh 1,68C	1 MWh 2,02C	2 MWh 1,51C	2 MWh 2,02C	3 MWh 1,68C
20	—	1 MWh 2,02C	2 MWh 1,51C	2 MWh 2,02C	3 MWh 1,68C
25	—	1 MWh 2,02C	2 MWh 1,51C	2 MWh 2,02C	3 MWh 1,68C
30	—	—	—	—	—

Tabell 5.11: Tabell for utbygging av antall fly i Sandane. Se vedlegg 1

5.2.4.3 Sette inn ZA50 i dagens rutetabell

Ser vi på utbygging av alle dagens fly til ZA50 kan vi sette opp en kalkyle for energiforbruket i løpet av et døgn.



Figur 5.7: Effektforbruk i løpet av et døgn på Sandane lufthavn. Se vedlegg 2

Ut ifra kalkylen i vedlegg 2 kan det beregnes at man trenger en batteribank på 2200 kWh og en C-rating på 1,7 C. Denne kalkylen gir en mindre batteribank enn hva kalkylen for maksimal utnyttelse av flyplassen gir. Grunnen til det er at dette er en mer skreddersydd analyse av flyplassen. Det er også tatt utgangspunkt i dagens ruteplan, og denne har færre fly enn hva som maksimalt er mulig for Førde lufthavn. Noen av flyene i denne analysen lader lengre enn de i den gjennomsnittlige analysen gjennomført i vedlegg 2.

5.2.4.4 Maks utnyttelse av flyplassen

Det tas utgangspunkt i at et elektrisk fly har en batterikapasitet på 252 kWh (Zunum ZA10), eller 1200 kWh (Zunum ZA50), og at denne må fullades fra 0 kWh hver gang flyet lander. Sandane lufthavn kan da maksimalt ta imot og lade opp 28,57 \approx 28 stk ZA10 eller 6 stk ZA50 i døgnet.

$$300 \text{ kW} \times 24 \text{ h} = \mathbf{7200 \text{ kWh}}$$

$$\mathbf{ZA10: } 7200 \text{ kWh} / 252 \text{ kWh} = \mathbf{28,57 \text{ stk}}$$

$$\mathbf{ZA50: } 7200 \text{ kWh} / 1200 \text{ kWh} = \mathbf{6 \text{ stk}}$$

Vanligvis ankommer siste fly Sandane lufthavn kl. 21:37 og første går kl. 06:22 neste dag. Det er da 8 timer og 45 minutter der flyplassen ikke har aktivitet. Dette innebærer at om man ønsker å benytte flyplassen med maksimal aktivitet må det lande 1,87 \approx 2 stk ZA10 eller 0,39 \approx 1 stk ZA50 i timen, i de timene flyplassen har aktivitet. Det er da behov for en batteribank på 2481 kWh \approx 2500 kWh og 0,81C \approx 1C for ZA10 fly. For ZA50 er en batteribank på 2400 kWh og 2C tilstrekkelig. Dette er forutsatt at flyene fullades på 15 min (vedlegg 1).

Flytype	Antall fly	Batteribank	C-Rating
Zunum ZA10	28 stk	2500 kWh	1 C
Zunum ZA50	6 stk	2400 kWh	2 C

Tabell 5.12: Maks utnyttelse, Sandane

5.2.5 Sogndal

Nettilførselen ved Haukåsen er ifølge Sognekraft begrenset til dagens behov. Det er derfor 0 kW tilgjengelig i nettet som kan benyttes til lading av elektriske fly.

5.2.5.1 Erstatning av dagens kabinkapasitet

På Sogndal lufthavn Haukåsen er det i dag 9 flyvninger i døgnet. Se oversikten under.

	Antall fly i snitt (per dag)	Antall seter i dag (per år)	Antall brukte seter (per år)	Antall elektriske fly som trengs per dag (19-seters)	Antall elektriske fly som trengs per dag (12-seters)	Antall elektriske fly som trengs per dag (9-seters)
Bergen	2	24 336	12 168	2,05	3,25	4,33
Oslo	3	36 504	27 378	4,62	7,31	9,75
Ørsta/ Volda	1	12 168	9 126	1,54	2,44	3,25
Sandane	2	24 336	18 252	3,08	4,88	6,50
Florø	1	10 140	5 070	1,03	1,63	1,81
Totalt	9	107 484	71 994	12,32	19,50	25,64
Avrundet	9			13	22	26

Tabell 5.13: Fly, Sogndal

Forutsatt at vi erstatter dagens fly med 22 stk 12 seter Zunum ZA10, vil vi minimum trenge 231 kW i timen eller 5544 kWh i døgnet. Tar vi utgangspunkt i 9 stk 48 seter Zunum ZA50, vil vi minimum trenge 450kW i timen eller 10 800 kWh i døgnet.

ZA10:

$$231 \text{ kWh} \times 22 \text{ stk} = 5544 \text{ kWh}$$

$$5544 \text{ kWh} / 24 \text{ h} = 231 \text{ kW}$$

ZA50:

$$1200 \text{ kWh} \times 9 \text{ stk} = 10800 \text{ kWh}$$

$$10800 \text{ kWh} / 24 \text{ h} = 450 \text{ kW}$$

Ved Sogndal lufthavn ankommer siste fly kl. 21:10, og første fly går kl. 06:50 neste morgen. Det vil si at det er 9 timer og 40 minutter der flyplassen ikke har aktivitet. Skal flyplassen benyttes maksimalt må 1,44 \approx 2 stk ZA10 eller 0,63 \approx 1 stk ZA50 lande per time, når flyplassen har aktivitet (vedlegg 1).

Størrelsen på batteribanken kan variere noe, og tar vi utgangspunkt i ZA10 vil batteribanken avhenge av om man får 231 kW jevnt fra nettet hele døgnet eller 5544 kWh i løpet av natten når det er lite aktivitet. Får vi 231 kW i timen kan vi greie oss med en batteribank på 2000 kWh og omtrent 1C. Må vi lade opp batteribanken på natten, må den ha en kapasitet på minst 5544 kWh og ca. 1 C.

Med utgangspunkt i ZA50 vil størrelsen på batteribanken avhenge av om det blir tilført 450kW jevnt fra nettet hele døgnet, eller 10800 kWh i løpet av natten når det er lite aktivitet. Med en tilførsel på 450 kW i timen er en batteribank på 2400 kWh og 2C tilstrekkelig. Må batteribanken lades opp utelukkende på natten, må kapasiteten være på minst 10800 kWh og 1C.

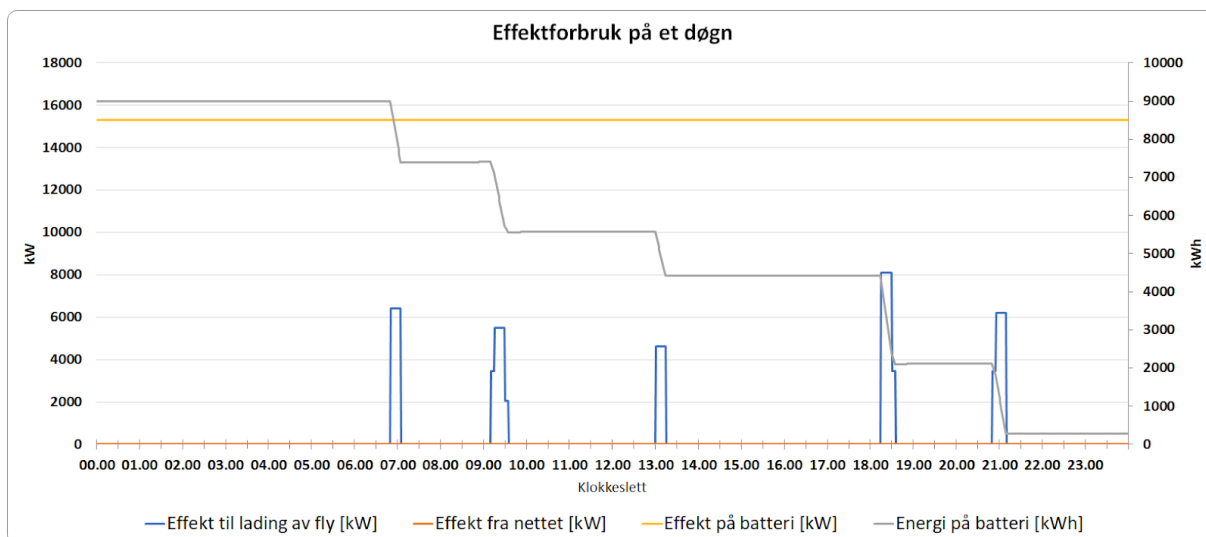
Dersom kun noen flyvninger byttes ut med elektriske fly, vil en mindre batteribank være tilstrekkelig.

Flytype	Antall fly	Batteribank	C-Rating
Zunum ZA10	22 stk	2000 kWh	1 C
Zunum ZA10*	22 stk	5544 kWh	1 C
Zunum ZA50	9 stk	2400 kWh	2 C
Zunum ZA50*	9 stk	10800 kWh	1 C

Tabell 5.14: Maks utnyttelse, Sogndal. *Kun lading på natten. Se vedlegg 1

5.2.5.2 Sette inn ZA50 i dagens rutetabell

Figur 5.8 er en visualisering av effektforbruket ved Sogndal lufthavn, Haukåsen. Her er lading av batteribanken ikke implementert da det ikke er tilgjengelig nettkapasitet i området. Resultatet er derfor ikke mulig å bruke i praksis, da batteribanken kun vil forsyne flyplassen i et døgn og deretter være tom.



Figur 5.8: Effektforbruk i løpet av et døgn på Sogndal lufthavn. Se vedlegg 2

Ut ifra figur 5.8 ser man at det trengs en batteribank på 9000 kWh og en C-rating på 1,7 C. Resultatet i figur 5.8 viser at batteribankbehovet er mindre enn behovet som er lagt frem i tabell 5.14. Grunnen til dette er at figur 5.8 visualiserer en mer skreddersydd analyse av flyplassen.

Det er også tatt hensyn til at flyene ikke benytter hele sin elektriske rekkevidde. Det kreves derfor ikke lading fra 0-100% ved ankomst slik som er antatt i vedlegg 1, som er bakgrunnen for tabell 5.14.

6 Analyse

6.1 Utforming av mulige løsninger

Som nevnt tidligere har det vært utfordrende å få tak i data fra flyprodusentene, og forslagene som blir presenterte må dermed ses i sammenheng med antagelsene vi har tatt tidligere i oppgaven.

Mye tyder på at batteribanker er dyrere i drift, og krever mer vedlikehold enn hva en høyspentlinje (kabel/luftlinje) krever. Investeringen i nettutbygging kan imidlertid være kostbar. Fordelen med batteribanker er at energien kan lagres på flyplassen til det er behov for den. Den billige, ikke-regulerbare energien fra nettet kan da lagres på natten og bli brukt på dagtid. Er det plassert ut flere batteribanker er det også mulig å vedlikeholde den ene, mens en annen drifter flyplassen. I tillegg vil man da ha tilgjengelig effekt på flyplassen om det skulle bli et brudd i nettet. Batteribankene kan også brukes til peakshaving som reduserer effektledet på strømregningen.

Om man velger å forsterke nettet kan installasjonskostnaden bli større enn ved installasjon av batteribanker, mens driftskostnadene med stor sannsynlighet blir mindre. Her er man avhengig av hvor langt det er til sterkt nok nett og hvor mye jobb og kostnader som er knyttet til å forsterke nettilførselen. Normalt sett kan man få tilgang på så mye effekt man bare ønsker, men det koster (viser til 7.2 Økonomi).

Det Norske strømnettet har en meget høy oppetid på 99,988% [38], og sannsynligheten for strømstans er derfor ganske lav. Om man likevel ønsker en reserveløsning ved tilfeller av strømstans, anbefaler vi et dieselaggregat. I samråd med lokale kraftselskap bør hver flyplass gjøre en vurdering om hvor lenge de kan komme til å være uten effekttilførsel ved et strømbrudd.

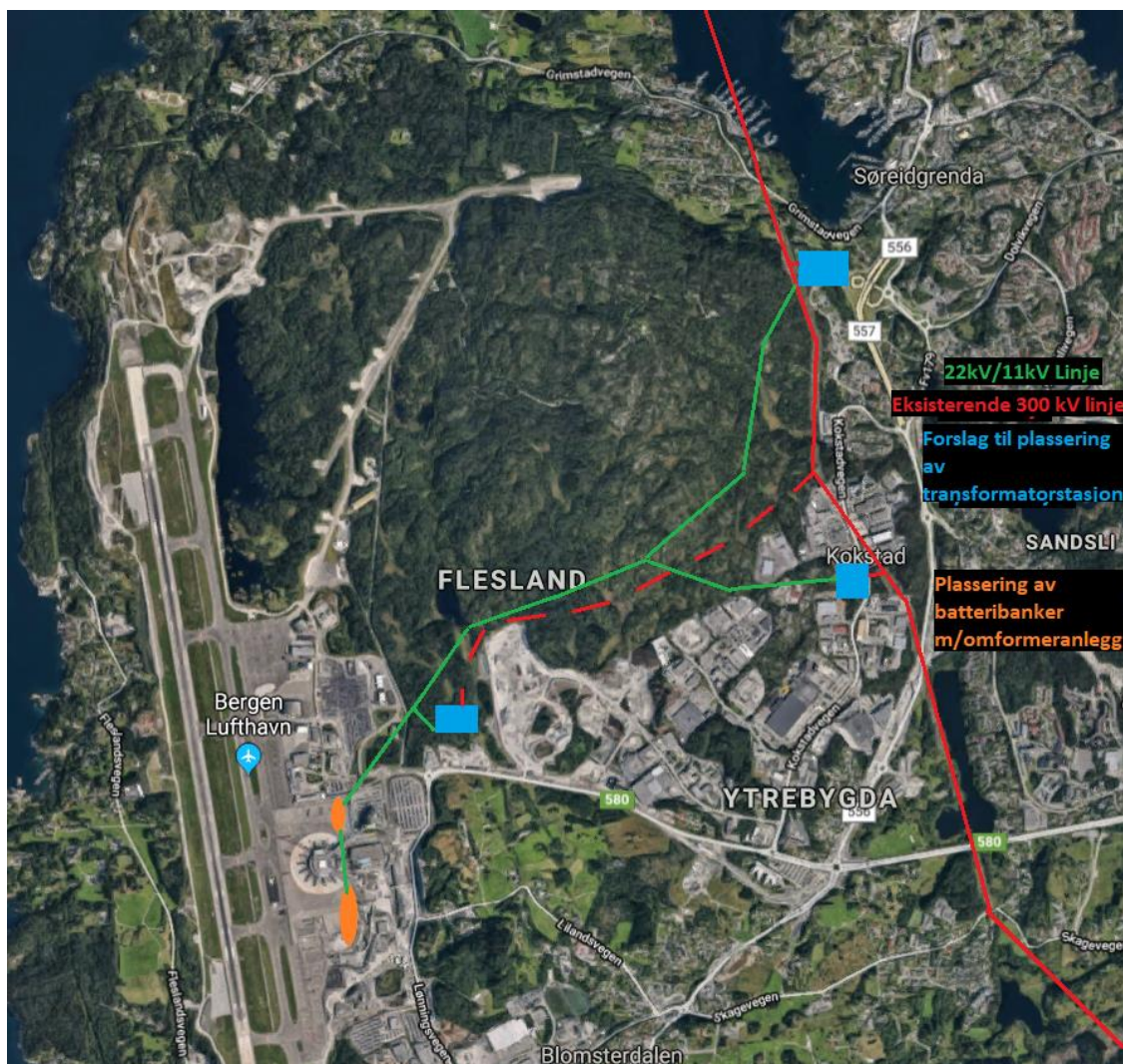
Ønsker man å lade direkte fra nettet trengs det minst 1 MW ved hver gate for Zunum ZA10 fly (eller tilsvarende), eller 4,8 MW for Zunum ZA50 fly (eller tilsvarende).

Teoretisk sett er det tilstrekkelig med en gate som er lagt opp til lading av fly, men det anbefales at minst to gater gjøres klar for lading. Dette er fordi flyene i dag normalt er samlet rundt morgenen og ettermiddagen, og man da ofte vil måtte lade flere fly samtidig. Ved å ha to gater har man også muligheten til å fortsatt drifte flyplassen om det skulle skje noe med den ene, eller hvis det må utføres vedlikehold.

6.1.1 Bergen

Flesland er den største flyplassen blant dem vi ser på i oppgaven, og den ligger i relativ kort avstand fra de andre. Som nevnt i kapittel 4.5.1 er det derfor naturlig å se på Flesland som et knutepunkt for de andre flyplassene når innføringen av elektrifiserte fly starter. Det vil av den grunn være behov for store energimengder her. Batteribanker vil være en mulighet her også, men dette kan fort bli dyrt i innkjøp da behovet for energikapasitet er stort og antageligvis vil øke etterhvert som flere ruter elektrifiseres.

Siden det finnes et sterkt nett i relativt kort avstand fra flyplassen vil det være mulig å lade flyene direkte fra nett. Dette vil skape høye effekttopper i starten som kan føre til høye strømutgifter, men etterhvert som flere ruter elektrifiseres vil lasten bli jevnere. Batteribank kan også brukes i kombinasjon med lading fra nett for å jevne ut de største effekttoppene.



Figur 6.1: Plassering av transformatorstasjon og batteribanker ved Flesland

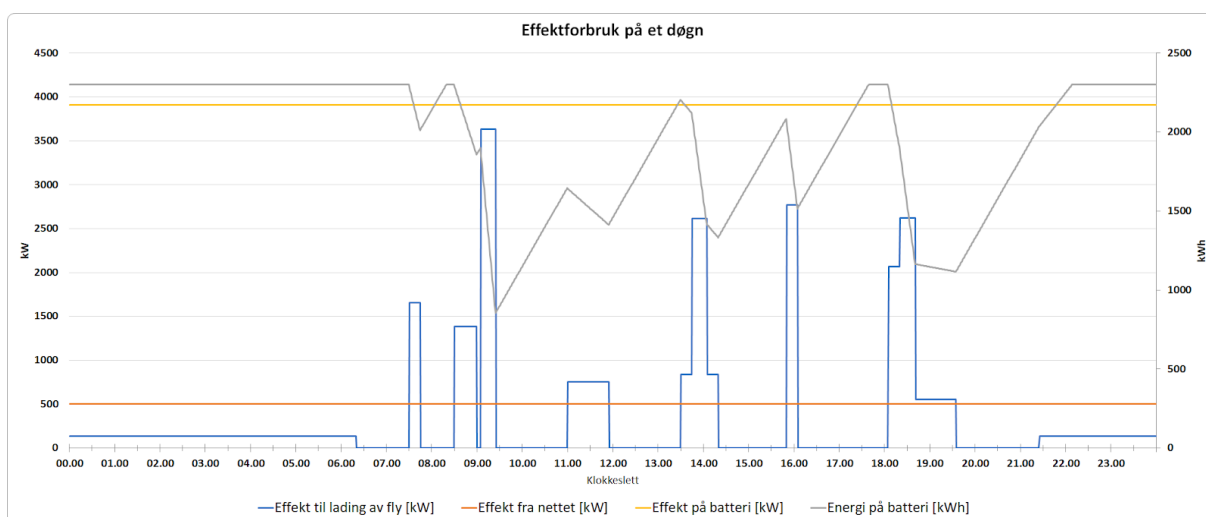
Ved Flesland har vi lagt fram tre forslag for hvor en ny transformatorstasjon kan bygges. Dette må gjøres uavhengig av om ladingen skjer fra nett eller batteri, og den bør mates fra eksisterende 300 kV linje for å kunne levere ønsket effekt til lufthavnen. Plasseringen av batteribankene er bare et forslag, men de bør stå så nærme flyene som mulig for å forhindre høye effekttap. Uansett om man velger en løsning med batteribanker eller direkte lading bør det foretas utbygging av nettet for at Flesland skal kunne tas i bruk av elektriske fly i større skala.

Vår anbefaling på Flesland er at man bygger ut nettet til flyplassen sterkt nok til å kunne lade flyene direkte. I tillegg kan man supplere med en batteribank for å håndtere de største effektpeakene. Etter hvert som flere flyruter elektrifiseres vil man antageligvis ha fly til lading nesten hele tiden. Dette vil medføre at nettet opplever ladingen som en tilsynelatende jevn last. Utbyggingen vil i første omgang bli en stor kostnad, men på sikt vil dette trolig lønne seg.

6.1.2 Florø

Beregningene i kapittel 5.2.2 viser at en batteribank på 2 MW og 2C vil kunne lade 30 fly i døgnet, der opptil 4 fly kan lade samtidig (forutsatt Zunum ZA10). Dersom kabinkapasiteten i dagens 10 dash-8-100 skal byttes ut med Zunum sine ZA10 må gjennomsnittlig 1,5 fly lades i timen, de timene flyplassen er i drift i dag.

Skal man i fremtiden sette inn Zunum ZA50 (eller fly med tilsvarende spesifikasjoner) vil en batteribank på 2 MW og 2C være tilstrekkelig (forutsatt samme ruteplan som i dag).



Figur 6.2: Effektforbruket i løpet av et døgn på Florø lufthavn med en batteribank på 2 MW og en C-rating på 2C

6.1.3 Førde

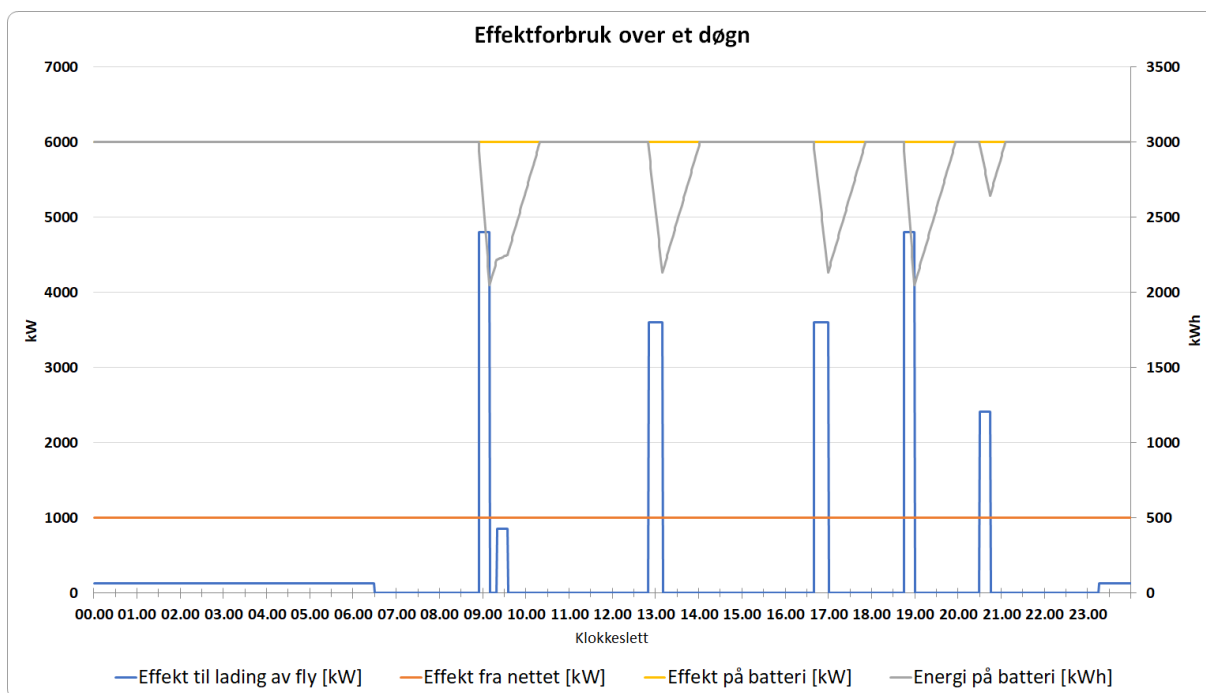
Førde er geografisk plassert i senter av de flyplassene vi ser på. Dette, i kombinasjon med den gode nettilførselen, gjør Førde lufthavn godt egnet som reserveflyplass hvis omkringliggende lufthavner skulle ha problemer med tilførselen eller rullebanen. Det kan derfor være gunstig å overdimensjonere anlegget i Førde for å håndtere eventuelle uforutsette hendelser.



Bilde 6.1: Avstander mellom flyplasser

Fra beregningene i kapittel 5.2.3 fremgår det at man med en batteribank på 1 MW og 2C, maksimalt kan lade 30 fly i døgnet, der to fly kan lade samtidig (forutsatt Zunum ZA10). Ifølge beregningene må dagens sju Dash-8-100 erstattes med 16 stk Zunum ZA10, noe som gir et gjennomsnitt på ca. 1 fly som lader i timen, de timene flyplassen er i drift. Skal Førde lufthavn fungere som en reservelufthavn for de andre i området, anbefaler vi at man setter inn en større batteribank eller bygger ut nettet.

Dersom det skal legges opp til at dagens kabinkapasitet skal erstattes med 7 stk Zunum ZA50 (eller fly med tilsvarende spesifikasjoner) i fremtiden må batterikapasiteten økes til 3 MW og 2C. Dersom denne batteribanken settes inn på Bringeland vil lufthavnen ha tilstrekkelig kapasitet til å kunne lade 5 stk ZA10 samtidig, noe som er veldig positivt dersom Bringeland skal brukes som erreserveflyplass (beskrevet under kap 4.2.2 "Backup").



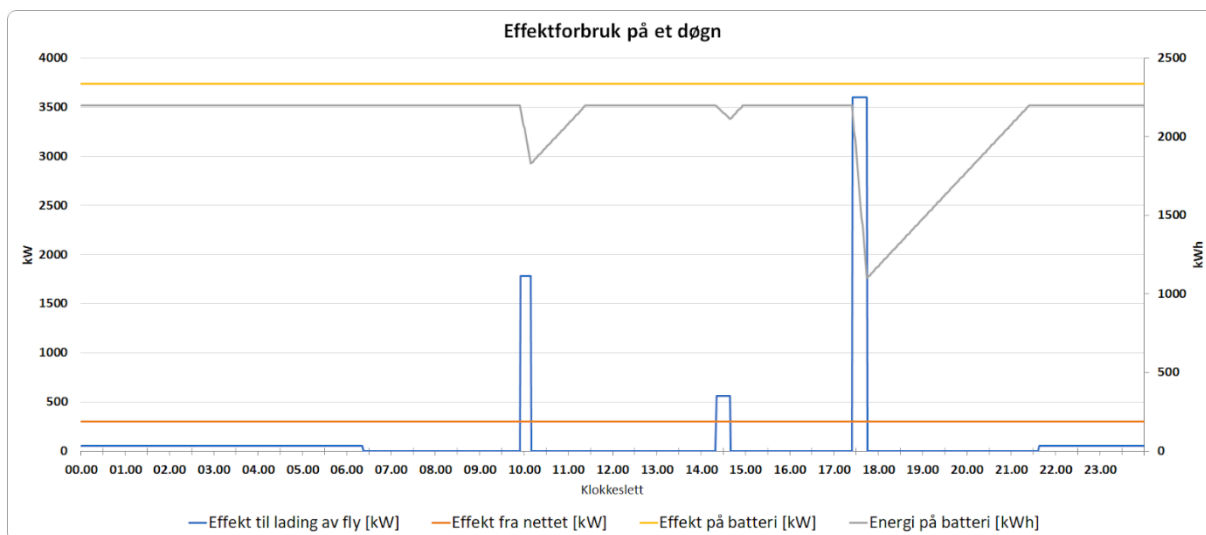
Figur 6.3: Effektforbruket i løpet av et døgn på Førde lufthavn med en batteribank på 3 MW og en C-rating på 2C

Teoretisk sett er én gate som er lagt opp til lading av fly tilstrekkelig, men det anbefales at minst to gater gjøres klar for lading. Dette er fordi at man får mulighet til å lade to fly samtidig, da flyene i dag normalt er samlet rundt morgenen og ettermiddagen. Ved å ha to gater har man også muligheten til å fortsatt drifte flyplassen om det skulle skje noe med den ene, eller hvis man må drive vedlikehold. Ønsker man også å benytte Førde som en reserve, bør man vurdere om det kan være nødvendig å legge frem flere ladepunkter slik at flyplassen kan håndtere økt trafikk.

6.1.4 Sandane

Ut ifra beregningene i kapittel 5.2.4 trengs det en batteribank på 1 MW og 2C for å lade 25 fly i døgnet, der 2 fly kan lade samtidig (forutsatt Zunum ZA10). Erstattes dagens fire Dash-8-100 med 10 Zunum ZA10, må gjennomsnittlig 0.7 fly lades i timen, i løpet timene flyplassen er operativ.

Skal man i fremtiden sette inn Zunum ZA50 (eller fly med tilsvarende spesifikasjoner), blir vi nødt til å øke batteribanken til 2 MW og 2C (forutsatt samme ruteplan som i dag).



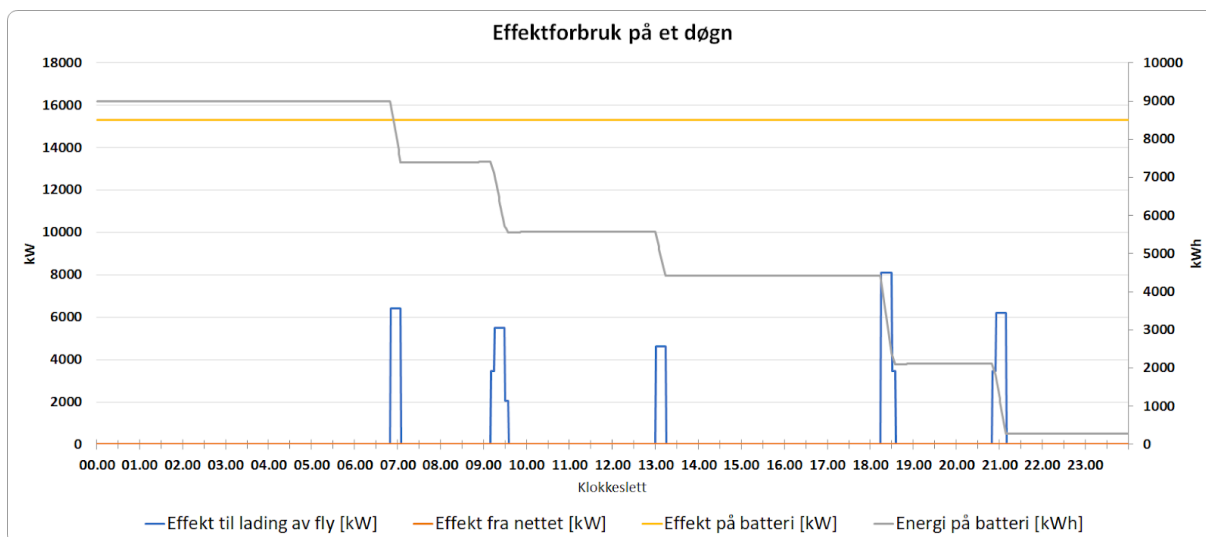
Figur 6.4: Effektforbruket i løpet av et døgn på Sandane lufthavn med en batteribank på 2 MW og en C-rating på 2C

Teoretisk sett er det tilstrekkelig med en gate som er lagt opp til lading av fly, men det er hensiktsmessig å klargjøre minst to gater, slik at det er mulig å lade to fly samtidig. Det er flere avganger på morgenen og ettermiddagen kontra resten av dagen. Flere fly må derfor lades samtidig for å opprettholde både den lave turnaround-tiden og antall flygninger. Ved å ha to gater har man også muligheten til å drifte flyplassen selv om det skulle skje noe med den ene, eller hvis det er behov for vedlikehold.

6.1.5 Sogndal

På figur 6.5 kan man se at det ikke kan leveres effekt fra nettet per i dag. Det vil derfor kreves forsterkning av linjene som leverer strøm til lufthavnen og oppgradering av transformatorstasjonene på Kaupanger. Det anbefales i tillegg å installere batteribanker for peakshaving og jevn last på nettet.

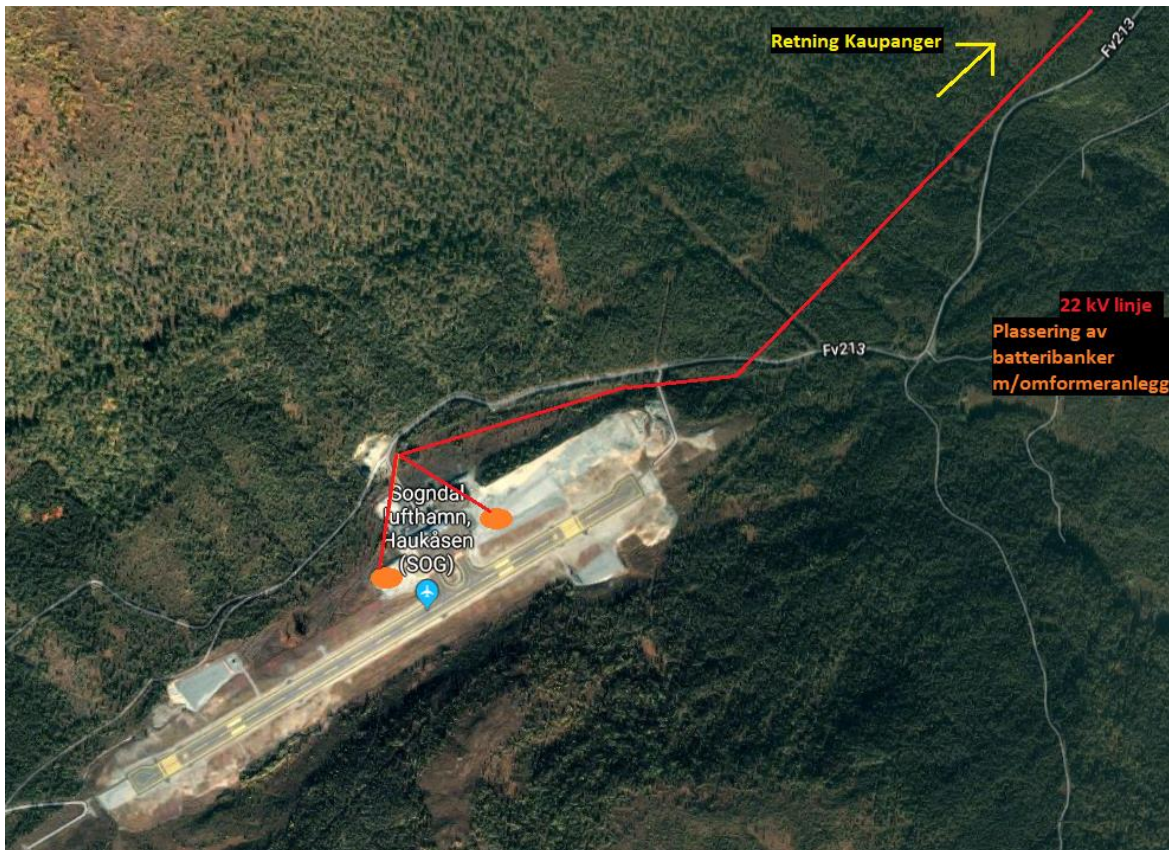
Beregningene i kapittel 5.2.5 viser at man med en batteribank på 2,4 MW og 1,7C kan lade 22 fly i døgnet (forutsatt Zunum ZA10). Denne batterikapasiteten er tilstrekkelig for å drifte flyplassen et helt døgn uten å få tilført energi, men per dags dato kan ikke denne batteribanken lades opp igjen med eksisterende nett. Dersom nettet bygges ut slik at batteribanken kan lade kontinuerlig, vil behovet for batterikapasitet gå ned.



Figur 6.5: Effektforbruket i løpet av et døgn på Sogndal lufthavn med batteribank på 900 kW og en C-rating på 1,7C

Skal man i fremtiden sette inn Zunum ZA50 (eller fly med tilsvarende spesifikasjoner) bør batteribanken økes til 3-4 MW (forutsatt samme ruteplan som i dag).

Ønsker man å legge frem høyspentnett og dermed lade direkte fra nettet må man legge frem minst 1 MW for Zunum ZA10 fly (eller tilsvarende) eller 4,8 MW for Zunum ZA50 fly (eller tilsvarende) til hver gate som skal benyttes av elektriske fly.



Figur 6.6: Skisse av plassering av batteribanker ved Sogndal lufthavn

På figur 6.6 ser vi Sogndal Lufthavn Haukåsen med eksisterende 22 kV linje fra Kaupanger, og mulig plassering av batteribanker til lading av fly. Siden tilførselen til denne flyplassen er dårlig, vil det være fornuftig å bruke batteribanker for å lagre energien som er tilgjengelig på natten. Batteribankene bør plasseres så nærme gaten og flyene som mulig for å minske overføringstap. Hvis direkte lading fra nett er ønskelig kan man forsterke linjene og transformatorstasjon fra Kaupanger, og dermed styrke overføringskapasiteten.

6.2 Konklusjon på løsning

Flyplassene som blir sett på i denne oppgaven har forskjellige utfordringer, og får dermed ulike forslag til hvordan ladingen bør løses. Løsningene kan forenkles til at de små flyplassene med lite trafikk og dårlig nettilførsel bør ta i bruk batteribanker, mens ved store flyplasser med mye trafikk bør flyene lades direkte fra nett i kombinasjon med batteridrift.

Ved de små flyplassene kan det da være mulig å lade batteribankene, enten med jevnt trekk hele døgnet, eller på natten når strømmen er billig. De minste og lettest trafikkerte lufthavnene er Sandane og Sogndal. Disse lufthavnene har dårlig effekttilførsel fra nett, og det vil derfor være fornuftig å anvende batteribanker til lading her. I Sogndal er det i dag ikke tilgang på effekt og det vil derfor være nødvendig å bygge ut nettet uavhengig av hvilken løsning man velger. Da trafikken ikke forventes å øke, vil det ikke være behov for å øke batterikapasiteten nevneverdig på sikt.

I Florø og Førde er det mulig å lade elfly med tilsvarende dagens kabinkapasitet, med en batteribank som trekker jevn belastning fra nettet hele døgnet. I rapporten er det konkludert med at lading fra batteribank vil være den beste løsningen, med forbehold om at antall flygninger ikke økes mye. Dersom nettet likevel blir bygget ut i nærområdet vil størrelsen på batteribankene kunne reduseres, men dette er ikke en nødvendighet. Beregningene for kapasitetsbehovet på flyplassene er presentert i kap 5.2.2 og 5.2.3. De er også presentert i oppsummeringen i tabell 6.1 under.

Flesland har forholdsvis mange flygninger per i dag, og det finnes mulighet for å få høyere effekt ved å forsterke nettilførselen. Da tilknytning til sterkt nett er både billigere og enklere å utføre enn å installere store mengder batteribanker, ses dette på som mest hensiktsmessig ved denne lufthavnen, og andre med samme forutsetning. Det kan dog være en god ide å bruke batteribanker i kombinasjon med lading fra nett på de tyngst trafikkerte flyplassene, herunder Flesland. Man vil da kunne kutte de dyre effekttoppene som oppstår når flere fly skal lade samtidig, noe som kan lønne seg på sikt.

Dagens strømmett i Norge har en meget høy oppetid på 99,988% [38] noe som medfører at sannsynligheten for strømstans er ganske lav. Om man likevel ønsker en reserveløsning i tilfelle strømstans, anbefaler vi et dieselaggregat. Her bør hver enkelt lufthavn ha en dialog med sitt lokale nettselskap, og ta en risikovurdering i samråd med dem angående sannsynligheten og risikoen for strømbrudd ved den enkelte flyplassen. Ut ifra en slik risikoanalyse og beregningene for effektbehov, kan det avgjøres hvor store dieselaggregater og -reserver det er behov for på hver enkelt flyplass.

Grunnet den korte distansen mellom flyplassene er det mulig å tenke nytt når det kommer til backup. Dersom det inntreffer en feil på tilførselen eller ladesystemet på en lufthavn, kan denne isoleres ut til feilen er utbedret. Førde ligger geografisk sett midt i regionen, noe som gjør Førde lufthavn til et ideelt sted å lande i tilfelle feil på destinasjonslufthavnen. Dette i kombinasjon med at det er mye tilgjengelig effekt i Førde, gjør det mulig å bruke Bringeland som en reserveflyplass for flyplassene rundt. Ved å innføre denne løsningen vil det ikke være behov for å lagre energi på flyplassene rundt, og det vil være tilstrekkelig å sette inn batteribankene som må til for å opprettholde daglig drift, i tillegg til et aggregat for nødtilførsel. Dersom dette alternativet skal implementeres er det naturlig å overdimensjonere effektbehovet eller sette inn ekstra aggregater ved Bringeland slik at lufthavnen har kapasitet til å lade de ekstra flyene.

Batteribanken ved Flesland er dimensjonert for å kunne drifte flygningene på Vestlandet i et døgn, og vil deretter være tom på grunn av mangel på nettilførsel. Dersom man tenker langsiktig vil en omfattende utbygging av nettet mest sannsynlig lønne seg.

Oppsummeringstabell for effektbehov ved lufthavnene med dagens utgangspunkt. Dagens kabinkapasitet er her byttet ut med elektriske fly, ZA10 og ZA50.

	Batteribank (Gitt ZA10)	Batteribank (Gitt ZA50)
Bergen	2000/4284 kWh 1C	2400/10800 kWh 1C
Florø	2000 kWh 2C	2000 kWh 2C
Førde	1000 kWh 1C	3000 kWh 2C
Sandane	1000 kWh 1C	2000 kWh 2C
Sogndal	2500 kWh 1C	2400 kWh 2C

Tabell 6.1: Batteribanker, oversikt

På flyplasser med veldig høy aktivitet og mange fly som skal lades i løpet av en dag, kan effekttoppene komme så tett at de tilsynelatende tilsvarer en jevn last. I dette tilfellet vil en batteribank ikke være nødvendig, men et slikt scenario vil derimot ikke realiseres før langt frem i tid. Lading med batteribank er en løsning som er ansett som mest aktuell på flyplasser med lang avstand til sterkt nett, og der det ikke er sannsynlig at det kommer til å bli nevneverdig økning av flytrafikken.

7 Diskusjon

7.1 Ny informasjon mot slutten av oppgaven

Temaet elektrifisering av lufthavner har fått en økt interesse i media den siste tiden. Flesland har blitt nevnt som et mulig testsenter og det gjør oppgaven vår mer aktuell [20]. Som et resultat tok BKK kontakt igjen for å høre hvilke løsninger som ble diskutert i rapporten. I den forbindelse ble beregningene fra rapporten som var tilknyttet Flesland delt med BKK, og 23.04.19 fikk vi tilbakemelding. I videre dialog de påfølgende dagene kom det frem at BKK anser at den beste løsningen for Flesland er å forsterke nettet i området rundt for å gjøre det mulig å lade flyene direkte fra nettet. BKK har som nevnt tidligere opplyst at det ikke er tilgjengelig effekt i nettet rundt Flesland, så en slik forsterkning vil mest sannsynlig bli kostbar. Det ble også lagt frem nye opplysninger som vil bli gjennomgått under, men som ikke ble opplyst om i startfasen av oppgaven.

BKK gir altså uttrykk for at det vil være mulig å få til en løsning med direkte lading fra nettet, mens i rapporten har formålet vært å unngå store laster direkte fra nett. Grunnen til at det ikke nødvendigvis er ønskelig å lade direkte fra nett er fordi det er uheldig å trekke store effekter fra nettet over korte perioder. Spørsmålet som gjerne dukker opp er knyttet til kostnader og hvor mye en er villig til å investere i forsterking av nettet, kontra batteribanker og vedlikehold av disse. Igjen er det vanskelig å vurdere løsningene opp mot hverandre da det er vanskelig å oppdrive informasjon om hva de forskjellige løsningene vil koste.

De nye opplysningene som har dukket opp gjennom arbeidet har endret en del av premissene for hvordan vi har valgt å løse oppgaven. Gjennom vår utdanning, dialog med veileder, nettselskapene og Avinor, er det forstått slik at peakshaving i nettet er sterkt ønskelig å få til. Dette har vært noe av grunnlaget for at vi har valgt å legge så mye arbeid i batteribank-løsningen. I samråd med veilederen vår har vi også kommet frem til at de nye opplysningene fra BKK er lagt frem for sent til at de skal gjøre store endringer på oppgaven.

Med den nye informasjonen og villigheten fra nettselskapene om å forsterke nettet og tillate store effekter under korte tidsperioder, vil løsninger med direkte lading fra nettet bli svært aktuelt. På flyplasser som ligger nært et sterkt nett, vil sannsynligvis direkte lading fra nettet være veien å gå. Også på flyplasser der man antar at flytrafikken vil å øke, bør det vurderes å forsterke nettet fremfor en mellomløsning der flyene lades kun fra batteribanker. Utrekningsmodellene våre vil kunne brukes uavhengig av hvilke løsninger som blir valgt.

Mot slutten av perioden slapp Zunum nye tall på ZA10 og ZA50 sin rekkevidde. Disse er presentert i kapittel 4.1.4. De oppdaterte verdiene er noe høyere enn de som er brukt i beregningene, noe som kan resultere i et høyere ladebehov enn det som er konkludert med i oppgaven.

7.2 Økonomi

Når man skal velge blant de forskjellige løsningene, er pris en viktig faktor da man til enhver tid ønsker å få til en billigst mulig løsning. Det er forsøkt å få tak i priser på hva det vil koste med en batteribank eller hva det vil koste å forsterke nettet på de aktuelle lokasjonene. Tilbakemeldingen er at slike løsninger vanligvis skreddersys for den enkelte lokasjon og prisnivå kan derfor ikke gis uten å gjøre grundige analyser. Derfor har det ikke vært mulig for oss å ta en konkret vurdering på hvilken løsning som er mest økonomisk gunstig. Av den grunn er ikke pris regnet med i vår vurdering. Dersom man ønsker å vurdere løsningene med hensyn på pris anbefales det å legge den ut på anbud.

BKK har derimot kommet med et grovt overslag, der de antyder at kostnadene ved å sette opp ny nettstasjon samt linje vil koste mellom 0,5-10 millioner kroner. Fordi dette er det eneste prisanslaget vi har fått, i tillegg til at det er svært unøyaktig, har det ikke vært mulig å vurdere dette opp mot andre løsninger, eksempelvis batteribanker.

Ved direkte lading fra nett må en være oppmerksom på de omtalte effektpeakene. I utbedringen av nettet er det derfor viktig å dimensjonere nettet til å håndtere disse peakene. Et nett som skal tåle peaker må være kraftig overdimensjonert i forhold til hva som trengs til normal drift. Dette medfører at nettkunden vil måtte betale et relativt høyt effektledd i forhold til hvor mye energi de faktisk bruker. Som forklart tidligere vil en batteribank kunne brukes for å redusere peakene ved at de store effektene trekkes fra batteribanken istedenfor direkte fra nettet. Batteribanken alene vil lade seg opp over lengre tid gjennom hele døgnet, noe som fører til jevnere last på nettet og et lavere effektledd.

Det er rimelig å anta at vedlikeholdskostnadene på en kabel eller luftlinje er lavere enn på en batteribank. Avhengig av avstanden til et sterkt punkt i nettet, kan derimot etableringskostnadene ved å forsterke nettet bli høyere enn å installere batteribanker. Hva som er mest økonomisk lønnsomt blir da en totalvurdering, men det antas at en forsterkning av nettet vil lønne seg på lang sikt. Skal man vurdere de forskjellige løsningene videre bør man hente inn mer konkrete priser fra leverandører før man tar en avgjørelse.

Når det kommer til det å elektrifisere flytrafikken i Norge kan man anta at dette vil kunne føre til billige flyreiser for folk flest. Grunnen til dette er at prisen på strøm er betraktelig billigere enn prisen på drivstoff til konvensjonelle fly. En annen faktor som også kan føre til billigere flybilletter er det at en elektromotor har betraktelig mindre deler og dermed mindre vedlikehold enn en jetmotor eller turboprop [45].

Den siste tiden har også flere ledende politikere i energi- og miljøkomiteen uttalt seg om implementering av elfly. Flere av dem viser til hvordan man i Norge har brukt politisk vilje til å få til en stor elektrisk bilpark og elektrifisering av ferger langs Norskekysten. De viser også interesse for å bruke like virkemidler i tilretteleggingen for elfly i Norge. Som leder av energi- og miljøkomiteen på Stortinget Ketil Kjenseth uttalte til Dagbladet; *“ - Det betyr at vi må nulle ut billettmoms, og alle avgifter - som passasjeravgift og landingsavgift, samt legge til rette for at flyplasseierne kan tilby lading. Der er vi allerede kommet godt i gang, i øyeblikket konkurrerer Sola, Flesland og Bodø om å bli den første helelektriske flyplassen i Norge”*. Det er med andre ord ikke den politiske viljen som setter “fugler i propellen” for elektrifiseringen av luftfarten [46].

7.3 Arbeidsprogresjon

Ideen om å skrive en bacheloroppgave om lading av elektriske fly startet da vi leste en artikkel i Teknisk Ukeblad. Temaet virket svært interessant og fremtidsrettet, og i den forbindelse tok vi kontakt Avinor i slutten av februar 2018 med spørsmål om de var interessert i å lage en oppgave om dette temaet. Vi kom i kontakt med Olav Mosvold Larsen som ønsket å hjelpe oss med informasjon og flere opplysninger. Etterhvert fikk vi tilsendt Avinors rapport «Introduction of Electric Aircraft in Norway» slik at vi kunne sette oss grundigere inn i temaet. Etter å ha tilegnet oss kunnskap om temaet avtalte vi et møte med Erik By i Avinor 8.mai 2018. I dette møtet fikk vi vite litt mer om Avinors planer for elektrifiseringen av luftfarten i tillegg til at By foreslo at vi kunne se på muligheten til å kunne lade elektriske fly ved flyplassene på Vestlandet (Bergen, Førde, Florø, Sogndal og Sandane).

Høsten 2018 tok vi kontakt med nettselskapene ved de aktuelle flyplassene for å kartlegge hvor mye effekt som er tilgjengelig i områdene rundt lufthavnene. Dette skulle vise seg å være tidkrevende, men mot slutten av 2018 hadde vi fått det vi behøvde for å starte, og vi var klare for å starte det offisielle bachelorarbeidet januar 2019.

Gjennom hele arbeidet med oppgaven har vi hatt hyppig kontakt med Avinor for å diskutere/drøfte nødvendige problemstillinger vi har møtt på. Vi har også hatt jevnlig telefonmøter med dem hvor vi har gjennomgått momenter ved rapporten, og fått gode, konstruktive tilbakemeldinger. I tillegg til møter med Avinor har vi også hatt jevnlig møter med veilederen vår.

Det er både fordeler og ulemper med å være en gruppe på fire medlemmer. Kommunikasjon er veldig viktig for å kunne gjennomføre et slikt prosjekt på en bra måte, og med fire medlemmer kan misforståelser og dobbelt arbeid fort oppstå dersom man kommuniserer dårlig. Vi har løst denne problemstillingen ved å ta i bruk nettapplikasjonen "Google dokumenter". Gjennom hele prosessen har vi tatt i bruk denne applikasjonen for å holde all informasjonen samlet, i tillegg til at vi enkelt har kunnet oppdatere og redigere i sanntid i samme dokument. I slutfasen har det vært utfordrende å fordele arbeidsoppgaver mellom alle fire gruppemedlemmer, og samtidig passe på at alt skal henge sammen og at ingenting blir oversett eller glemt.

En stor fordel med å være en stor gruppe er at vi kan fordele oppgaver og utnytte hverandres sterke sider. Gruppemedlemmene har variert bakgrunn og ulik erfaring, noe som har skapt mange konstruktive og lærerike diskusjoner. Variert bakgrunn og kompetansespekter gjør altså at vi som gruppe utfyller hverandre og samlet innehar vi de kvalitetene en god gruppe burde ha.

Gjennom oppgaven har vi prøvd å ta problemene ved roten etterhvert som de har oppstått. Vi var tidlig ute med forarbeid, som gjorde at vi kunne fordele konkrete arbeidsoppgaver tidlig i prosessen. Det gode forarbeidet har ført til at vi har hatt tid og mulighet til å drøfte innholdet i rapporten. Alt i alt er vi fornøyd med samarbeidet og prosessen gjennom oppgaven.

8 Konklusjon

I startfasen av oppgaven hadde vi en visjon om å legge frem et konkret forslag til ladesystem ved hver av de fem flyplassene på Vestlandet. Dette skulle vise seg å ikke være gjennomførbart grunnet mangel på informasjon fra flyprodusenter om spenninger, frekvenser, energitetthet, C-rating med mer. Grunnet dette har oppgaven utviklet seg til å være basert på antagelser og forutsetninger, og resultatet er ikke like konkret som vi hadde ønsket. Dette har også medført at vi ikke har kunnet komme med forslag på hvordan ladestasjonen ved gaten skal se ut og fungere. Det er drøftet ulike løsninger i kapittel 4.7, men det er ikke konkludert med en konkret løsning. Likevel kan man anta at plug-in-løsningen sannsynligvis er den mest aktuelle.

Ut fra dagens kabinkapasitet er det foretatt beregninger på hvor mange fly som sannsynligvis skal trafikkere rutene mellom de aktuelle flyplassene. Med bakgrunn i disse beregningene og data fra nettselskapene kan man konkludere med at hver enkelt lufthavn bør ha en batteribank for å kunne lade flyene og unngå effektpeaker, etter de forutsetningene som er satt.

	Batteribank (gitt ZA10)	Batteribank (gitt ZA50)
Bergen	2000/4284 kWh 1C	2400/10800 kWh 1C
Florø	2000 kWh 2C	2000 kWh 2C
Førde	1000 kWh 1C	3000 kWh 2C
Sandane	1000 kWh 1C	2000 kWh 2C
Sogndal	2500 kWh 1C	2400 kWh 2C

Tabell 6.1: Batteribanker, oversikt

Uavhengig om man velger å lade direkte fra nett, batteribank eller en kombinasjon av disse er det behov for en overføring på 1 MW for å lade et ZA10-fly. Tilsvarende vil ZA50 ha behov for 4,8 MW med de forutsetningene vi har satt. Skal en flyplass gjøres klar til lading av elfly, burde det i tillegg legges frem kabler til en ekstra gate/ladestasjon. Ved ekstra gater åpnes muligheten for å lade flere fly samtidig. Dette er nødvendig på de store lufthavnene og kan være praktisk på de mindre, spesielt med tanke på at feil på laderen kan inntreffe og det er da uheldig å kun ha én ladestasjon. Ved Florø, Førde og Sandane lufthavn anses batteribanker i kombinasjon med dagens nettkapasitet å være tilstrekkelig for å kunne lade elfly, så lenge antall reisende fra flyplassene ikke økes i særlig grad fra dagens nivå.

Ved Sogndal lufthavn er det ikke tilgjengelig effekt i nettet til lading av elfly. Her bør det foretas en grundig vurdering om det er mulig å hente ut den nødvendige effekten, enten på nattestid eller på andre måter, til en batteribank. Alternativt kan nettet bygges ut for å øke effekttilførselen til lufthavnen. Dersom nettet skal bygges ut må det vurderes i hvilken grad det skal forsterkes, og om direkte lading er aktuelt eller ikke. Det er få flygninger til og fra flyplassen, noe som gjør at det eventuelt vil bli store effektpeakere med jevne mellomrom gjennom hele dagen. Dersom et jevnt trekk fra nettet gjennom hele døgnet eller på natten er mulig, er en løsning tilsvarende den på Sandane eller Florø lufthavn mest gunstig.

Når det gjelder Bergen lufthavn er det ikke ledig kapasitet i nettet per dags dato, men BKK har vist interesse (kapittel 7.1) for å bygge ut nettet slik at Flesland kan lade elfly i fremtiden. I første omgang kan en batteribankløsning på lik linje med på Florø, Førde og Sandane virke som et godt alternativ. Batteribanken i tabell 6.1 har høy kapasitet på grunn av at den ikke kan få tilført energi per i dag. Batteribanken er dimensjonert for å kunne drifte flygninger på Vestlandet i et døgn, og vil deretter være tom. Dersom man tenker langsiktig vil en omfattende utbygging av nettet mest sannsynlig lønne seg.

I fremtiden vil flere og flere ruter elektrifiseres og ved Flesland blir nok effektbehovet for stort for å kunne drives av batteribanker alene. En mindre batteribank kan likevel benyttes til peakshaving når det er størst pågang. Ved Flesland vil det som sagt være relativt få fly som skal lades i løpet av en dag i første omgang. Da vil ladingen oppleves som effektpeakere i nettet når lasten kobles inn og ut. I fremtiden når flere flyvninger blir elektrifisert vil antageligvis et eller flere fly lade samtidig så og si hele tiden på store flyplasser som Flesland. Dersom dette er tilfelle vil effektpeakene komme så tett at de oppleves som en jevn last, selv om flyene kontinuerlig kobles til og fra. Ved slike lufthavner anses direkte lading som det beste alternativet på sikt da effektforbruket vil være jevnt høyt hele dagen. Det kan likevel være aktuelt å ha mindre batteribanker for å kunne dempe de største effektpeakene.

Strømnettet i Norge har en meget høy oppetid på 99,988% [38] i landsgjennomsnitt. Dette medfører at sannsynligheten for strømbrudd er ganske liten. Det kan likevel være aktuelt å sette opp et dieselaggregat som kan brukes i tilfelle strømbrudd.

Utredningen viser at lading av elektriske fly er fullt mulig å få til. Før mer konkrete planer vedrørende hvordan ladeanlegg skal se ut og fungere, må flyprodusentene komme ut med tekniske krav til ladingen. Flyprodusentene må også ha et marked å selge elfly til. For å vise at markedet er tilstede er offensiv planlegging av infrastruktur i og rundt flyplassene en god start. Fordelen i Norge er at dersom norske myndigheter ønsker å implementere elektrifiserte flyvninger i Norge, har de mulighet til å benytte seg av FOT-ruter på kortbanenettet. I tillegg kan andre avgiftssystemer brukes til å enten kreve eller premiere bruk av elfly. Politisk innsats er derfor sentralt for å kunne realisere elektrifisert luftfart i Norge.

8.2 Videre arbeid

Temaet lading av elektriske fly er helt i startgropen og vi tror dette har stort potensiale i fremtiden. I første omgang vil vi anbefale en videre utredning av de resterende flyplassene til Avinor i Norge. Til dette arbeidet kan Excel-arkene vi har utviklet benyttes. Ut fra dette vil det være mulig å vurdere hvilke flyplasser og flyruter man bør begynne en utbygging på.

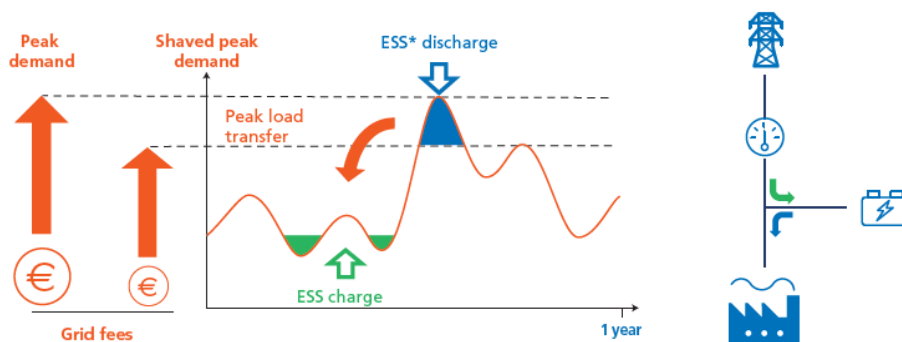
Foruten om rene elektrorelaterte problemstillinger vil man også kunne lage oppgaver knyttet til økonomi- og logistikkfag innen dette temaet. I en slik oppgave vil man kunne se på hva som er mest økonomisk lønnsomt av utbygging i nettet og installering av batteribanker på flyplassene. En vil også kunne sammenligne lønnsomheten i å la flyene stå lengre på bakken og lade på lavere effekt kontra å bygge ut nettet/ta i bruk batteribanker for å kunne lade på kortere tid. Det vil også være nyttig å se på logistikken rundt flyruter og mulige endringer av disse.

Med andre ord er dette temaet gjenstand for både rene elektrooppgaver, tverrfaglige oppgaver, samt økonomi- og logistikkoppgaver. Ønsker man å utelukkende studere økonomi- og logistikkaspektet ved dette temaet, vil antageligvis Avinor eller universitet/høgskolen kunne bidra på de elektrotekniske spørsmålene.

Om Avinor ønsker å lage flere studentoppgaver på dette temaet, anbefaler vi at de er behjelpelige, helst på forhånd, med å innhente informasjon fra flyprodusenter og nettselskaper. Dette har bakgrunn i vår erfaring med at flyprodusenter ikke er særlig behjelpelige med å gi ut informasjon, særlig til studenter. Nettselskapene derimot har vært behjelpelig med å gi oss informasjon. Flaskehalsen i oppgaven har imidlertid vært at prosessen med å få tak i informasjonen har tatt lang tid. Det kan derfor være lurt å innhente informasjon så tidlig som mulig, helst før bachelorprosjektet starter.

9 Forkortelser og ordforklaring

- **Turnaround-tid:** Den fullstendige tiden fra et fly har parkert ved gate til det kjører ut for avgang
- **Kabinkapasitet:** Antallet seter til passasjerer i et fly
- **Effektledd:** En faktor som blir lagt til i strømregningen avhengig av hvor høye effekttopper man påfører nettet
- **APU:** Auxiliary Power Unit. Brukes til å lage strøm, hydraulisk trykk og trykkluft når hovedmotorene ikke går. Brukes også for å starte opp hovedmotorene
- **Peakshaving:** Når man bruker et medium, som et batteri, til å lagre energi når det er lite forbruk av energi i nettet for så å bruke denne lagrede energien når det er større behov. På denne måten kan man utnytte strømmettet best mulig i den forstand at man unngår å måtte bygge det ut for å håndtere noen få peakere som kanskje bare skjer noen få ganger



Bilde 10.1: Peakshaving

- **Holding (-pattern):** En metode som benyttes for å la fly vente på en mulig landingstillatelse. Dette vil normalt skje om det er for eksempel uvær, snørydding eller annet som forhindrer flyet fra å lande på den ønskede flyplassen. Dette vil normalt sett innebære at flyet flyr i et mønster angitt av flygeledere. Flyene er pålagt å ha med seg fuel for å kunne fly 30 min i et holding pattern
- **FOT-ruter:** Subsidierte flyruter som flys på oppdrag fra staten

10 Vedlegg

Vedlegg 1 - "Generell beregning", Excel ark

Vedlegg 2 - "Spesifikk beregning", Excel ark

Vedlegg 3 - "Brukerforklaring" forklaring av Excel ark 1 og 2

Vedlegg 4 - "Flyvninger"

11 Øvrige diagrammer

11.1 Figurliste

- Figur 5.4: Effektforbruket i løpet av et døgn på Bergen lufthavn
- Figur 5.5: Effektforbruket i løpet av et døgn på Florø lufthavn
- Figur 5.6: Effektforbruket i løpet av et døgn på Førde lufthavn
- Figur 5.7: Effektforbruket i løpet av et døgn på Sandane lufthavn
- Figur 5.8: Effektforbruket i løpet av et døgn på Sogndal lufthavn
- Figur 6.1: Plassering av transformatorstasjon og batteribanker ved Flesland
- Figur 6.2: Effektforbruket i løpet av et døgn på Florø lufthavn med en batteribank på 2MW og en C-rating på 2C
- Figur 6.3: Effektforbruket i løpet av et døgn på Førde lufthavn med en batteribank på 3MW og en C-rating på 2C
- Figur 6.4: Effektforbruket i løpet av et døgn på Sandane lufthavn med en batteribank på 2MW og en C-rating på 2C
- Figur 6.5: Effektforbruket i løpet av et døgn på Sogndal lufthavn med batteribank på 900 kW og en C-rating på 1,7C
- Figur 6.6: Skisse av plassering av batteribanker ved Sogndal lufthavn

11.2 Tabelliste

- Tabell 3.1: Tilgjengelig effekt i nettet
- Tabell 4.1: Data for Zunum ZA10 og ZA50
- Tabell 4.2: Luftlinjeavstander mellom flyplassene
- Tabell 5.1: Fly, Bergen
- Tabell 5.2: Effektbehov, Bergen
- Tabell 5.3: Maks utnyttelse, Bergen
- Tabell 5.4 Fly, Florø
- Tabell 5.5: Tabell for utbytting av antall fly i Florø
- Tabell 5.6: Maks utnyttelse, Florø
- Tabell 5.7: Fly, Førde
- Tabell 5.8: Tabell for utbytting av antall fly i Førde
- Tabell 5.9: Maks utnyttelse, Førde
- Tabell 5.10: Fly, Sandane
- Tabell 5.11: Tabell for utbytting av antall fly i Sandane
- Tabell 5.12: Maks utnyttelse, Sandane
- Tabell 5.13: Fly, Sogndal
- Tabell 5.14: Maks utnyttelse, Sogndal
- Tabell 6.1: Batteribanker, oversikt

11.3 Bildeliste

- Forsidebilde:
<https://www.tu.no/artikler/den-forste-elflymotoren-testes-snart-slik-jobber-zunum-for-a-elektrifisere-luftfarten/412257>
- Bilde 4.1: Sammenligning av ulike batterier
<https://journals.uic.edu/ojs/index.php/JUR/article/viewFile/7553/6045>
- Bilde 4.2: Oppladning av Li-ion batteri
<https://www.tu.no/artikler/slik-fungerer-batteriet-som-endret-verden/233862>
- Bilde 4.3: Utladning av Li-ion batteri
<https://www.tu.no/artikler/slik-fungerer-batteriet-som-endret-verden/233862>
- Bilde 4.4: Økning i investeringen i batteriindustrien
<https://qz.com/1383884/a-startup-promising-an-all-solid-state-rechargeable-battery-has-raised-20-million/>
- Bilde 4.5: Prosessen for utladning (a) og oppladning (b) for litium-sulfur batteri
<https://journals.uic.edu/ojs/index.php/JUR/article/viewFile/7553/6045>
- Bilde 4.6: Hybridfly
<https://zunum.aero/technology/>
- Bilde 4.7: Skisse av en batteribank
<https://corvusenergy.com/containerized-energy-storage-system/>
- Bilde 4.8: Hybridflyet Airbus E-Fan X som er basert på flytypen BAe 146
<https://www.airbus.com/newsroom/news/en/2018/07/the-future-is-electric.html>
- Bilde 4.9: Fly fra Zunum
<https://www.ainonline.com/aviation-news/air-transport/2019-01-03/zunum-runs-financing-trouble>
- Bilde 4.10: Fly fra Pipistrel
<https://www.mysanantonio.com/news/article/Tesla-loving-Norway-wants-to-be-a-pioneer-in-13019651.php>

- Bilde 4.11: Fly fra Eviation Aircraft
<https://robbreport.com/motors/aviation/eviation-alice-electric-airplane-revolution-sooner-than-you-think-2830522/>
- Bilde 4.12: Lademetoder
<https://avinor.no/contentassets/c29b7a7ec1164e5d8f7500f8fef810cc/introduction-of-electric-aircraft-in-norway.pdf>
- Bilde 4.13: Illustrasjonsbilde av induksjonslading
<https://www.vg.no/annosorinnhold/smart/komplett/395-tradlos-lading>
- Bilde 4.14: Induksjonslading av elektrisk ferge
<https://www.tu.no/artikler/de-lader-ferge-med-1-2-megawatt-effekt-uten-fysisk-kontakt-med-fartoyet/409255>
- Bilde 6.1: Avstander mellom flyplasser
https://www.norgeskart.no/?_ga=2.174574250.948638245.1558549865-1702173016.1556132793&fbclid=IwAR0f6kLGfPxm6YK9t0jUdSjKzKrmLUq3cMlJc8r5yZN1_Z0LNCepzg9xVE#!?project=norgeskart&layers=1002&zoom=4&lat=7197864.00&lon=396722.00
- Bilde 10.1: Peakshaving
<https://www.edf-re.de/en/peak-shaving-service/what-is-peak-shaving/>

Bibliografi

- [1] J. O. Reimers, «Introduction of electric aviation in Norway,» Green Future AS, Oslo, 2018.
- [2] P. E. Dalløkken, «tu.no,» 30 Mai 2018. [Internett]. Available: <https://www.tu.no/artikler/flyprodusentens-sjefingenior-er-skeptisk-til-elektriske-fly/438473>.
- [3] Battery university, «Battery university,» 9 Mars 2017. [Internett]. Available: https://batteryuniversity.com/learn/article/what_is_the_c_rate. [Funnet 7 Februar 2019].
- [4] Avinor, Regissør, *Avinor Electrification*. [Film]. Norge: Avinor, 2018.
- [5] Airbus, «Airbus,» Airbus.com, 17 Juli 2018. [Internett]. Available: <https://www.airbus.com/newsroom/news/en/2018/07/the-future-is-electric.html>. [Funnet 7 Februar 2019].
- [6] Avinor, «Avinor og Norsk Luftfart 2017,» Avinor, Oslo, 2017.
- [7] Avinor, «Avinor.no,» Avinor, 1 Januar 2019. [Internett]. Available: <https://avinor.no/konsern/om-oss/samfunnsoppdraget/samfunnsoppdraget>. [Funnet 11 Februar 2019].
- [8] Wikipedia, «Wikipedia,» Wikipedia, 25 Juli 2018. [Internett]. Available: <https://no.wikipedia.org/wiki/Kortbanenettet>. [Funnet 10 Februar 2019].
- [9] Avinor, «Avinor.no,» Avinor.no, 1 Januar 2019. [Internett]. Available: <https://avinor.no/konsern/miljo-og-samfunn/elfly/elektriske-fly>. [Funnet 11 Februar 2019].
- [10] Wikipedia, «Wikipedia,» Wikipedia, 21 Mars 2012. [Internett]. Available: <https://no.wikipedia.org/wiki/Kortbaneflyplass>. [Funnet 11 Februar 2019].
- [11] M. Rivers, «Forbes,» Forbes, 18 April 2018. [Internett]. Available: <https://www.forbes.com/sites/martinrivers/2018/04/18/wideroe-pins-future-of-social-routes-on-electric-plane-breakthrough/#2ad9481211d0>. [Funnet 12 Februar 2019].
- [12] Zunum Aero, «zunum.aero,» Zunum, 1 Januar 2017. [Internett]. Available: <https://zunum.aero/aircraft/>. [Funnet 12 Januar 2019].
- [13] Battery university, «Battery university,» Battery university, 1 Juni 2018. [Internett]. Available: https://batteryuniversity.com/learn/article/lithium_based_batteries. [Funnet 12 Februar 2019].
- [14] A. Rathi, «Quartz,» Quartz, 10 September 2018. [Internett]. Available: <https://qz.com/1383884/a-startup-promising-an-all-solid-state-rechargeable-battery-has-raised-20-million/>. [Funnet 12 Februar 2019].
- [15] Fastcompany, «Fastcompany.com,» Fastcompany.com, 1 Januar 2018. [Internett]. Available: <https://www.fastcompany.com/most-innovative-companies/2018/sectors/transportation?fbclid=IwAR1TDBe7-T6cmIs0GFMUxTaMR3gK129Y9anYdkY8NuuHdmsd5ujsZhpugw>. [Funnet 2 Februar 2019].

- [16] Eviation, «Eviation,» Eviation, 1 Januar 2019. [Internett]. Available: <https://www.eviation.co/alice/>. [Funnet 13 Februar 2019].
- [17] O. M. Larsen og E. By, Interviewees, *Telefonmøte*. [Intervju]. 2 Februar 2019.
- [18] Avinor, «Avinor.no,» Avinor, 1 Januar 2019. [Internett]. Available: <https://avinor.no/konsern/om-oss/samfunnsoppdraget/sikkerheit>. [Funnet 20 Mars 2019].
- [19] Oxisenergy, «Oxisenergy.com,» Oxisenergy, 1 Januar 2019. [Internett]. Available: <https://oxisenergy.com/products/>. [Funnet 3 April 2019].
- [20] Bt.no, «Flesland kan bli nasjonal pilot for testing av elfly,» BT.no, 21 Mars 2019. [Internett]. Available: <https://www.bt.no/nyheter/lokalt/i/kaAVxk/Flesland-kan-bli-nasjonal-pilot-for-testing-av-elfly>. [Funnet 21 Mars 2019].
- [21] T. Stensvold, «TU,» TU.no, 29 Desember 2017. [Internett]. Available: <https://www.tu.no/artikler/i-2021-vil-norge-ha-60-ferger-med-batterier-na-ma-vegdirektoratet-finne-en-standardlosning-for-lading/414997>. [Funnet 7 Mars 2019].
- [22] T. Stensvold, «TU,» Tu.no, 25 Januar 2016. [Internett]. Available: <https://www.tu.no/artikler/revolusjonerende-norsk-system-fortoyer-og-lader-skip-i-en-operasjon/276497>. [Funnet 7 Mars 2019].
- [23] T. Stensvold, «TU,» tu.no, 2017 Oktober 13. [Internett]. Available: <https://www.tu.no/artikler/de-lader-ferge-med-1-2-megawatt-effekt-uten-fysisk-kontakt-med-fartoyet/409255>. [Funnet 20 Mars 2019].
- [24] Wikipedia, «Wikipedia,» Wikipedia, 23 April 2019. [Internett]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Eviation_Alice. [Funnet 24 April 2019].
- [25] PIPISTREL, «Avinor.no,» 2018. [Internett]. Available: https://avinor.no/contentassets/c29b7a7ec1164e5d8f7500f8fef810cc/ivo-boscarol_pipistrel_oslo-22-march-2018.pdf. [Funnet 21 Mars 2019].
- [26] S. Alvarez, «Teslarati,» 27 September 2018. [Internett]. Available: <https://www.teslarati.com/tesla-powerpack-farm-australia-energy-storage-movement/>. [Funnet 21 Mars 2019].
- [27] Tesla, «Telsa.com,» 1 Januar 2019. [Internett]. Available: https://www.tesla.com/no_NO/powerpack. [Funnet 21 Mars 2019].
- [28] Corvus, «Corvusenergy,» Corvusenergy, 1 Januar 2019. [Internett]. Available: <https://corvusenergy.com/containerized-energy-storage-system/>. [Funnet 4 Mars 2019].
- [29] G. Ringheim, «Dagbladet,» 25 Mai 2019. [Internett]. Available: <https://www.dagbladet.no/nyheter/vil-fore-elbil-suksessen-til-himmels/71095877>. [Funnet 25 Mai 2019].
- [30] T. A. Berg, Interviewee, *Møte med BKK*. [Intervju]. 19 Oktober 2018.
- [31] E. Pettersen, «tv2,» tv2.no, 20 Februar 2019. [Internett]. Available: <https://www.tv2.no/a/10416191/>. [Funnet 26 Mars 2019].

- [32] Zunum aero, «zunum.aero,» 1 Desember 2018. [Internett]. Available: <https://zunum.aero/wp-content/uploads/2018/11/Zunum-overview-Dec2018-web1.pdf>. [Funnet 26 Mars 2019].
- [33] A. Staller, «Electrochem,» Electrochem, 17 Februar 2017. [Internett]. Available: <https://www.electrochem.org/redcat-blog/li-sulfur-battery-rivals-cycle-life-li-ion/>. [Funnet 26 Mars 2019].
- [34] H. L. Wangen, «UIT,» Universitetet i Trømsø Norges arktiske universitet, 19 Februar 2018. [Internett]. Available: https://uit.no/nyheter/artikkel?p_document_id=562800&p_dim=88208. [Funnet 27 Mars 2019].
- [35] L. Grønscar, «flynytt,» flynytt, 11 April 2019. [Internett]. Available: <http://www.flynytt.no/artikler/osm-aviation-bestiller-60-elfly/462963>. [Funnet 27 April 2019].
- [36] Stavanger aftenbladet, «aftenbladet.no,» stavanger aftenbladet, 29 November 2018. [Internett]. Available: <https://www.aftenbladet.no/lokalt/i/oROPP0/Flyplassen-bygger-allerede-neste-ar-gangbru-for-a-betjene--elektriske-fly>. [Funnet 27 Mars 2019].
- [37] T. L. Berg, «Filter Nyheter,» Filter Nyheter, 15 Februar 2018. [Internett]. Available: <https://filternyheter.no/kan-vi-fly-oslo-bergen-med-uten-flybensin-i-2040-et-realitisk-blikk-pa-elfly-hypen/>. [Funnet 13 Mai 2019].
- [38] H. Hans, «Avbrotstatistikk 2017,» Norges vassdrags- og energidirektorat, Oslo, 2018.
- [39] P. E. Dalløkken, «TU,» TU.no, 22 Mai 2019. [Internett]. Available: <https://www.tu.no/artikler/sas-og-airbus-gar-sammen-om-a-utvikle-hybridfly-og-elfly/465830>. [Funnet 27 Mai 2019].
- [40] NTB, «TU,» Teknisk ukeblad, 24 November 2017. [Internett]. Available: <https://www.tu.no/artikler/dette-blir-norges-forste-elfly/412867>. [Funnet 28 Mai 2019].
- [41] K. Vassbotten, *Kapasitet flyplass*, Florø: Kristian Vassbotn, 2018.
- [42] S. J. Frøiland, *Bacheloroppgave HVL-Avinor*, Sogndal: Stian J. Frøiland, 2018.
- [43] A. Fleten, *Bacheloroppgave HVL-Avinor*, Førde: Arild Fleten, 2018.
- [44] T. A. Berg, *Bacheloroppgave for Avinor*, Bergen: Thor Andre Berg, 2018.
- [45] O. R. Valmot, «Tu,» Teknisk ukeblad, 20 Mai 2018. [Internett]. Available: <https://www.tu.no/artikler/norge-skal-bli-forst-og-storst-pa-elektrisk-luftfart/437758>. [Funnet 28 Mai 2019].
- [46] G. Ringheim, «Dagbladet,» Dagbladet, 26 Mai 2019. [Internett]. Available: <https://www.dagbladet.no/nyheter/sier-ja-til-nullavgift/71104355>. [Funnet 29 Mai 2019].