

GRØNN LUFTFART TRØNDELAG

Kunnskapsgrunnlag

RENERGY Cluster 2026



Innholdsfortegnelse

1	Innledning og sammendrag	4
1.1	Anbefalinger for å muliggjøre grønn luftfart i Trøndelag	5
2	Begrepsforklaringer	7
3	Flysituasjonen i Trøndelag i 2023	8
3.1	Hvilke flytyper flyr i Trøndelag i dag	9
3.1.1	DAT som flyr ATR 42 mellom Oslo og Røros	9
3.2	Flytyper som flyr nasjonalt	10
3.2.1	Airbus A320	10
3.2.2	Boeing 737	11
3.3	Avstander mellom lufthavnene i Trøndelag	12
3.4	Fly i utvikling og forutsett rekkevidde for elektriske fly	12
3.5	Hvor mange konvensjonelle fly kan erstattes av utslippsfrie alternativer?	14
3.6	Hvor mange flyr i dag innenriks i Norge?	16
3.7	Endrede flymønstre grunnet begrenset rekkevidde	16
3.7.1	Oslo – Trondheim	17
3.7.2	Oslo – Bergen	18
3.7.3	Oslo – Stavanger	18
3.7.4	Oslo – Tromsø	19
3.7.5	Trondheim – Bodø	21
3.8	Kortbanenettet i Trøndelag og omheng – mulighet for vinterturisme	22
3.9	Hvilken rekkevidde kreves for å dekke alle strekninger	22
3.9.1	Forbedret tilgjengelighet på mindre flyplasser med nye bruksmønstre	23
3.10	Status på den elektriske flyutviklingen – hva er realistisk rekkevidde?	23
3.11	Sammenstilling – potensiale for elfly i Norge	24
4	Teknologien som flyr i 2023	26
4.1	Motorteknologier som driver fly	26
4.2	Propell, vifte og jetmotor	27
4.3	Motorteknologi – gassturbin med forbrenning og utslipp til luft	29
4.4	Konvensjonelt drivstoff – Jet A-1	29
4.5	Egenskaper og krav for flydrivstoff og sammenligning med SAF	30
4.6	Forventet påvirkning på billettpriser med SAF som utbytte for Jet A1	31
4.7	Støynivåer	32
5	Elektriske fremdriftssystemer fordeler og utfordringer	34
5.1	Elektriske fly – en introduksjon	35
5.2	Strøm og effektbehov for lading av elektriske batterifly	35

5.3	Batteriteknologi – innledning.....	37
5.4	Li-ion-teknologi	39
5.4.1	Hvordan fungerer et batteri?.....	39
5.4.2	Anode og katodematerialer.....	41
5.4.3	Termisk rusing – et sikkerhetsproblem med litium-ion-batterier	41
5.4.4	Fordeler og ulemper med hurtiglading og batteribytte.....	42
5.5	Faststoffbatterier – potensiale og forskningsstatus	43
5.6	Brenselceller – teknologistatus og fremtiden	44
5.6.1	Nåværende status for hydrogenbrenselceller i transportsektoren	44
5.7	Hybridsystemer	46
5.8	Sammenligning mellom elektriske motorer og gassturbiner	47
6	Infrastruktur og forutsetninger på lufthavnene	47
6.1	Introduksjon.....	47
6.2	Strøm og effektbehov for batterifly - scenarioer	48
6.3	Strøm og effektbehov for hydrogenfly og SAF	50
7	Forutsetninger for elektrifisering av luftfarten i Norge	52
7.1	Strømnettet – effektbegrensninger?.....	52
7.2	Energimengde – kan mer strøm produseres i Trøndelag?	53
7.3	Hydrogenproduksjon.....	54
7.4	Lokasjoner for hydrogenproduksjon	54
8	Status for utslippsfrie fly i 2025	54

1 Innledning og sammendrag

Luftfarten er helt vital for mobilitet og viktige samfunnsfunksjoner i Norge. Norge som land trenger også luftfart for effektiv transport til Europa og videre ut i verden. Dette medfører store utslipp, og utslipp fra luftfart er forventet å øke i tiden fremover. Denne økningen gjør det viktig å redusere utslipp i luftfarten både nasjonalt og globalt. I tillegg kan de tekniske løsningene som fungerer for luftfart muliggjøre løsninger for hele transportbransjen, både på land og til sjøs.

Utfordringene med å utvikle utslippsfrie alternativer som oppfyller de strenge sikkerhetskravene og de teknologiske utfordringene, er at det å ferdes i luften stiller meget høye krav på de tekniske løsningene. Flere nullutslippsteknologier er allerede under utvikling, med alt fra alternative drivstoff, elektriske motorer til hydrogenmotorer, batterier og brenselceller. Men det vil fortsatt ta flere år før de utslippsfrie tekniske løsningene er modne nok til å være tilgjengelige på et kommersielt marked i stor nok omfatning. De fleste av de løsningene som utvikles er rettet mot småfly og forventes ikke å kunne erstatte de store flyene som i dag opererer de fleste flyrutene globalt. Denne prognosen forsterkes av at flyprodusentene som Boeing¹, Airbus² og Embraer³, offisielt har sagt at de ikke kommer å ha utslippsfrie løsninger tilgjengelige før i 2035.

Nasjonale initiativ i Norge, som dette prosjektet, ønsker å etablere Norge som en internasjonal testarena for nye utslippsfrie fly. Målet med dette er å tiltrekke oss ny teknologi for å sikre tidlig etablering av utslippsfrie flyalternativ i Norge. Et nasjonalt samarbeid kan bidra til en akselerert innfasing av utslippsfrie teknologier, som nevnt i politiske ambisjoner som Stortingsmelding 10 og seneste Nasjonal Transportplan⁴. Avinor, som eier de fleste flyplassene i Norge, har en ambisjon om å legge til rette for nye alternativ med lavere utslipp enn dagens flyflåter. Norge har også et verdensunikt flynettverk med stort passasjergrunnlag på mange og korte ruter, noe som gjør Norge til et godt egnet land for innfasing av utslippsfrie småfly.

Denne rapporten kommer til å beskrive teknologiene som utvikles, fordeler og ulemper, muligheter og utfordringer, med et ekstra fokus på Trøndelag og Midt-Norge. Denne rapporten vil også undersøke mulighetene for å akselerere innfasingen av utslippsreducerende tiltak for å støtte den overliggende nasjonale ambisjonen om reduserte utslipp fra Norsk luftfart.

¹ https://investors.boeing.com/investors/news/press-release-details/2023/Boeing-Publicly-Launches-Cascade-to-Support-Aviation's-Net-Zero-Goal/default.aspx?_gl=1*_clseaj*_ga*MTQxMjc2MjMwMS4xNjk1Mzk5NjIw*_ga_3N2PEGZ4HD*MTY5OTQ2ODUyNy43NS4xLjE2OTk0ODQ4MjQuMC4wLjA

² <https://www.airbus.com/en/innovation/energy-transition/hydrogen/zeroe>

³ <https://embraer.com/global/en/news?slug=1207138-embraer-the-shape-of-things-to-come-new-sustainable-aircraft-concepts-revealed>

⁴ <https://www.regjeringen.no/no/tema/transport-og-kommunikasjon/artikler-2024/ntp-20252036-ny-nasjonal-transportplan-legges-fram-22.-mars/id3028985/>

1.1 Anbefalinger for å muliggjøre grønn luftfart i Trøndelag

1. Nasjonal strategi og prioriteringer i FOT-rutene

Ettersom transport av passasjerer og gods med fly er av nasjonal betydning i Norge og mange av rutene mellom småflyplasser er statsstøttede via FOT-ordningen bør det legges en nasjonal strategi som oppfyller både klimamål og mål for regional transport. Strategien må legge til rette for hvor man skal introdusere ny teknologi først, evaluere hvilke flyplasser som må tilpasses først, sikre at all infrastruktur forsynes disse flyplassene og så videre. Strategien må også ta hensyn til kostnaden for hvor mye CO₂-reduksjon som forventes og veie dette opp mot andre potensielle tiltak og omstillingsaktiviteter.

2. Løfte Trøndelags muligheter med Lv 132 Ørland og turisme

Her bør Trøndelag gi innspill og løfte frem mulighetene med forsvarets passasjertransport til Lv 132 Ørland og muligheten av å bruke Værnes som hub for det eksisterende kortbanenettverket til Rørvik og Namsos. En annen stor mulighet er å bruke småfly for vinterturisme til både Oppdal og Åre i Sverige.

3. Nasjonal strategi for energiforsyning

Avhengig av hvilke løsninger som kommer, stiller dette ulike krav på energisystemet og hvilket utstyr/infrastruktur det må investeres i på flyplassene. For batterifly kreves ladepunkter, tilgang til nok energi og effekt som stiller krav på sterkt nett som tar lang tid å bygge. Utbygging av slik infrastruktur bør også koordineres med utvikling av industri, ny kraftproduksjon og utvikling av utslippsfrie løsninger i andre deler av transportsektoren for å etablere nettutviklingen som kreves på en kostnadseffektiv måte.

De tre mest lovende teknologiene flyutviklerne nå jobber med er batteri, hydrogen og bærekraftige drivstoff (SAF). SAF kan bruke mye av den eksisterende infrastrukturen (men bør separeres avhengig av forskjellige motorers sertifiseringsnivå i flyene som skal bruke den aktuelle flyplassen), men både batteri og hydrogen krever mye ny infrastruktur på flyplassene. I dag finnes det lovende alternativ med både batteri og hydrogen som energilagringsmåte. Ulike flyplasser vil kreve ulike infrastruktur utfra flyenes behov. Større flyplasser krever infrastruktur som legger til rette for ulike energitilførselsmåter for flyene. Infrastrukturplanlegging bør planlegges sånn at det samsvarer med en nasjonal strategi for offentlig anskaffelse av regionale flyruter.

4. Begynne med regelutvikling sammen med EASA

For at sikkerhetsnivået til fly med ny teknologi skal være minst like godt som med dagens teknologi må det utvikles nye regler, sertifiserings og operatørkrav. Slike retningslinjer og krav tar tid å utvikle og teste og må gjøres sammen med EASA og utviklerne av den nye teknologien i flyene. Ettersom prosessen vil ta lang tid, anbefales dette å påbegynnes så fort som mulig.

5. Sette opp nye ordninger for FOT-ruter med lavere utslipp som krav

Norge har et unikt kortbanenett med høye nivåer av passasjerer og samfunnsfunksjoner som ikke finnes i samme utstrekning i andre land. Norge kan ta en fremskutt posisjon internasjonalt med innføring av utslippsfrie fly, da vi har unike muligheter ved anskaffelse av korte FOT ruter av staten. På samme måte som man har innført utslippsfrie ferger kan man gjøre noe lignende for luftfarten. Men utslippsfri luftfart må utvikles sammen med internasjonale myndigheter som EASA til forskjell fra marin transport, delvis for at vi ikke har samme kunnskapsnivå i Norge

innenfor luftfart som marin transport, men også for å sikre at alle flytyper som skal brukes godkjennes av EASA.

6. Utvikling av nye operasjonsmåter og flytrafikksystemer som tar hensyn til begrensninger i ny teknologi

Ny teknologi kommer til å tilføre andre muligheter og begrensninger enn eksisterende løsninger, dette vil mest sannsynlig også gjelde fly-ledningen, som vil bli nødt til å ta hensyn til diverse nye aspekter for å sikre sikker drift av nyutviklet flyteknologi. Disse hensynene må også være en del av sertifiseringsordningene sammen med EASA. Her har Norge en mulighet å ligge i forkant, ved å bruke Trøndelag som et kunnskapssentrum nasjonalt. Her kan det eksempelvis utvikles nye simulatorer som trafikkledere kan benytte til utdanning og opplæring, eller det kan etableres et nytt utdanningssentrum for flyledere spesialisert på ny teknologi som batterifly og hydrogenfly. Både hydrogen og batterier vil i lang tid fremover kreve at flyene som brukes er mindre enn i dag, noe som også kommer til å kreve nye bruksmønstre som påminner om måten flytrafikken fungerer i nord over hele landet. Hvis flyene skal operere på samme måte som i dag med relativt store fly også på innenriks flyvinger kommer vi ikke til å se en rask omstilling. Da er eneste alternativet SAF, noe som er meget resurskrevende å produsere i stor skala.

7. Utdanning av piloter, flytrafikkledere og servicepersonell for ny teknologi

I dag flyr fly med passasjerantall på 39 og oppover innenriks i Norge. De fleste av flyene som utvikles med utslippsfire alternativer er mindre enn dette og begynner på 5-9 passasjerer. For å erstatte behovet vil det derfor kreves et større antall mindre fly, og derfor langt flere piloter for å oppnå samme passasjerkapasitet som i dag. Altså, Norge må ha mange flere piloter som kan fly de nye og mindre flyene for å opprettholde dagens flytilbud. I tillegg må flyledere og servicepersonell også kunne håndtere de nye forutsetningene som den nye teknologien medfører. Høyere etterspørsel kommer mest sannsynlig til å kreve en kraftig utvidelse av dagens tilbud av pilotutdanning og/eller kreve nye utdanningslokasjoner. Trøndelag kan ta nytte av NTNU og kunnskapsmiljøet i Trøndelag for å utbedre dette tilbudet. Det er allerede startet et masterprogram for flyteknikere på NTNU, noe som kan brukes som et første steg for videre utvidelse og for Trøndelags rolle i omstillingen i luftfarten.

8. Identifisere pilotlinjer og introduksjonsplan nasjonalt

Mange av flyene som brukes på kortbanenettet i dag er nære sin tekniske maksimale levetid og trenger å erstattes. For at erstatningsbehovet skal foregå på en økonomisk effektiv måte og introduksjonen av ny teknologi på en sikker og kontrollert måte bør det legges en nasjonal plan for prosessen. Noen linjer kommer å være mer egnet enn andre for tidlig testing av teknologien, kostnadene og tekniske løsninger.

9. Nasjonal informasjonskampanje for transparens og økt kunnskap til allmennheten

For å unngå skepsis fra allmennheten, utnytte hele samfunnets kompetanse og oppnå generell aksept i samfunnet bør man også starte en informasjonskampanje. Kampanjen bør tydelig vise til fordelene og hvordan ny teknologi vil påvirke billettpriser og behovet for eventuell statlig støtte med skattemidler. En slik kampanje kan også være en fordel for grønn turisme i hele Norge og for en generell forståelse av utslippsreduksjonene som kan oppnås, og til hvilken pris.

10. Nasjonal strategi for SAF-produksjon

I løpet av prosjektperioden for dette prosjektet har vi sett en konsolidering i den elektriske luftfarten hvor mange aktører har gått konkurs eller avsluttet sine satsinger på batteri og/eller hydrogenfly grunnet høye kostnader og tekniske begrensninger.

På kort og mellomlang sikt, og i store fly også på lang sikt, er den eneste muligheten da alternative flydrivstoff, SAF. For å legge til rette for produksjon av store nok mengder SAF til å kunne påvirke utslippet må en nasjonal strategi utvikles med fremtidige planer som tilfører økte muligheter for grønt hydrogen, grønne kilder for karbontilgang, og muligheter for raffinering.. En slik eskalering vil kreve mye kraft og store investeringer i kraftsystemet, derav vil det bli et behov for nasjonal samhandling som tar sikte på å få skalaen opp til et tilstrekkelig stort nivå for å kunne nå EUs oppsatte mål om innblanding av SAF.

2 Begrepsforklaringer

Forkortelse	Forklaring
e-fuels	Elektrodrivstoff. Drivstoff fremstilt fra hydrogen og en karbonkilde
SAF	Sustainable Aviation Fuel. Bærekraftig flydrivstoff
Pax	Antallet passasjerer i et fly
MTOW	Maximum Take-Off Weight. Den maksimale tillatte vekten et luftfartøy er sertifisert for ved avgang

Betegnelse	Forklaring	Enhet
W	Akustisk kraft langt fra kilden	Pa?
K	Lighthills konstant	-
ρ_0	Uniforme fluidhastighet	m/s
c_0	Lydhastighet	m/s
L	Karakteristisk lengde for turbulenskilden	m
U	Karakteristisk hastighet for turbulenskilden	

3 Flysituasjonen i Trøndelag i 2023

I Trøndelag dominerer Værnes når det gjelder antallet fly og passasjerer stort, rett og slett fordi Værnes er flyplassen til Trondheim som er den klart største byen og agerer som en hub for de andre, videre ut i verden enten direkte, via Oslo, København eller Stockholm. En typisk dag avgår omtrent 90 fly fra Værnes. Til sammenligning har de andre flyplassene i Trøndelag bare 2 til 3 avganger i døgnet.

Tabell 1: Omtrentlig antall flyavganger daglig, inkludert flystørrelse målt i antall passasjerer.

Lufthavn	Avganger	Flystørrelse [pax]	Fly med <40 pax
Værnes	90	39-200	18 (20 %)
Namsos	3	39	3 (100 %)
Rørvik	3	39	3 (100 %)
Røros	2	39	2 (100 %)

Som en sammenfatning kan man se i tabellen at Værnes har mange flere flyavganger, og i tillegg er flyene større, særlig på avganger til store byer både innenlands og utenlands. Eksempelvis til Bergen, Oslo, København, Stockholm og Amsterdam. Fra de småflyplassene (Namsos, Rørvik og Røros) er det bare innenriks trafikk. Til og fra Namsos og Rørvik går det bare fly til Trondheim, og fra Røros bare til Oslo. Så utbudet er begrenset og Rørvik/Namsos bruker Værnes som en hub for videre fly. Flyet som går mellom Værnes og Rørvik mellomander i Namsos på veien.



Widerøe er bedriften som opererer mye av rutene til småflyplasser i Norge og er alene om å fly til og fra flyplassene ved Namsos og Rørvik. (Fra april 2024 opererer danske Danish Air Transport linjen mellom Oslo og Røros). På Værnes operer flere bedrifter som SAS, Norwegian, Widerøe, KLM, WizzAir og Finnair.

Flyet Widerøe i dag bruker til og fra småflyplassene er en DASH-8 100/Q200. Dette flyet har 39 seteplasser og flyr i omtrent 500 km/t. Det er et forholdsvis gammelt fly som ble introdusert for kjøp i 1984. De små modellene bygges ikke lengre og det finnes få moderne varianter siden utviklingen generelt har flyttet seg i retning større fly. Widerøe har derfor forlenget levetiden⁵ for disse småflyene og sagt at de skal erstattes av nullutslippsfly før 2030⁶. Det gjenstår å se hvorvidt nullutslippsfly er ferdigutviklet og sertifiserte til 2030, og hvilken teknologi de inneholder.

Figur 1: En Widerøe De Havilland Dash 8-100.

⁵ <https://www.nrk.no/nordland/wideroe-og-de-havilland-canada-forlenger-levetiden-pa-10-dash-8-100-1.15938460> - 13/06/2023

⁶ <https://www.tu.no/artikler/wideroe-har-startet-samarbeid-med-rolls-royce-om-a-utvikle-nullutslippsfly/472682> - 13/06/2023

3.1 Hvilke flytyper flyr i Trøndelag i dag

Flytypen som brukes mellom mindre flyplasser kan typisk ta med seg 30-50 passasjerer, dette segmentet kalles i flyverden for pendlersegmentet, eller «commuter» segmentet på engelsk fagspråk.

Fra Værnes til Namsos og Rørvik flyr i dag Widerøe med modellen De Havilland Dash 8-100. Sammenlignet med andre fly som flyr fra Værnes er det det minste flyet, men sammenlignet med størrelsen på de elektriske flyene i utvikling er det stort. Konsekvensen er at hvis elektriske fly skal kunne erstatte flyene må det bli flere avganger. En fordel med flere og mindre fly er at man kan gi større fleksibilitet i reisetilbudet, men det krever også flere piloter og avganger for samme antallet passasjerer.

En Dash 8-100 har en rekkevidde på omtrent 1800 km. Denne rekkevidden setter flyene i stand til å kunne fly til og fra alle flyplasser i Norge uten mellomlanding. Den lengste mulige flyruten i Norge er fra Stavanger til Kirkenes, som er 1663 km. Det er en stor forskjell mellom utslippsfrie teknologier og fly som brenner fossilbaserte drivstoff når det kommer til rekkevidde. Det viser også tydelig hvor mye energi fossile drivstoff inneholder i forhold til både vekt og volum. Akkurat dette er den største utfordringen for alle ikke-fossile fly, hvordan får man lang nok rekkevidde med utslippsfrie fremdriftssystem og ikke-fossile energibærere?

De øvrige flytypene Widerøe bruker på kortbanenettet er alle Dash 8 fly i forskjellige varianter.

Tabell 2: Data for sammenligning av Widerøe sin flyflåte brukt på kortbanenettet og innenriks fly.

Modell	Pax	Nyttelast [kg]	Power [hk]	Range [km]	Banelengde [m]	Skalert bilde
100	39	3603	2 x 2150	1889	1000	
Q200	39	3995	2 x 2262	2084	1000	
Q300	50	5897	2 x 2380	1711	1180	
Q400	78	8747	2 x 5071	2040	1425	

De andre flytypene Widerøe og andre operatører bruker, som SAS og Norwegian, har ofte enda lengre rekkevidde og er heller ikke begrenset av dette.

3.1.1 DAT som flyr ATR 42 mellom Oslo og Røros

Røros lufthavn har ikke noen ruter til de andre lufthavnene i Trøndelag, men en egen rute til Oslo. Denne opereres av det danske selskapet DAT (Danish Air Transport). DAT flyr ruten med fly fra produsenten ATR med fly av modellen ATR 42. Det er faktisk det eneste flyet i størrelsen 30-50 pax i produksjon i verden i dag⁷. Ifølge ATR sin hjemmeside kreves det også for ATR 42 og ATR 72 1000 m rullebane, noe som ikke er et problem på Røros som har 1720 meter lang rullebane. På ZERAC

⁷ <https://www.atr-aircraft.com/aircraft-services/aircraft-family/atr-42-600/>

konferansen 2023 hadde ATR flere representanter på plass for å selge inn sine fly som erstatning til Widerøe sin gamle Dash 8-flåte.

Tabell 3: Sammenligning av Dash 8 og ATR.

Parameter	Dash 8 Q200	ATR 42
Produsent	De Havilland Canada now Bombardier	ATR Aérospatiale/Aeritalia
Første flyvning	20. juni 1983	16. august 1984
Type	Regional turboprop	Regional turboprop
Pax	Opptil 39	42-50
Lengde	22,25 meter	22,67 meter
Vingespenn	25,91 meter	24,57 meter
Høyde	7,49 meter	7,59 meter
Maks Takeoff Vekt	16466 kg	18600 kg
Tomvekt	10150 kg	11250 kg
Cruise Speed	467 km/t	556 km/t
Rekkevidde	1463 km	1480 km
Høyeste flyhøyde	7620 meter	7620 meter
Motorer	2 x Pratt & Whitney Canada PW123	2 x Pratt & Whitney Canada PW120
Motoreffekt (aksling)	2150 hk	2000 hk
Drivstoffkapasitet	3487 liter	5700 liter
Drivstofforbruk	~600 liter per time	~700 liter per time
Thrust-to-weight	0,135	0,12
Lastvolum	1422 m ³	1571 m ³
Landingsgir	Innfellbar med tre punkter	Innfellbar med tre punkter
Besetning	2	2

Som vi kan se av tabellen er flyene like hverandre i sin grunnleggende utforming. ATR-flyet som har blitt kontinuerlig oppgradert, og fortsatt er i produksjon, er mer drivstoffeffektivt enn Dash 8. Årsaken til dette er at motorene er av en nyere variant som er mer effektiv. Andre ting som mer moderne vinger kan også bidra til forskjellen. Dette vil også si at med mindre drivstofforbruk per passasjerer er ATR 42 flyet litt bedre for miljøet siden det kan fly lengre/ta flere passasjerer per liter drivstoff.

3.2 Flytyper som flyr nasjonalt

Når det gjelder nasjonale flyruter flys det generelt større fly enn til de småflyplassene Rørvik, Namsos og Røros. Typisk flytype mellom Trondheim og Oslo er Airbus A320 eller Boeing 737, begge disse flymodellene finnes i mange forskjellige varianter og videreutviklinger.

3.2.1 Airbus A320

Airbus A320 er et av de mest populære flyene i verden, designet for å konkurrere direkte med Boeings 737 modell. Introdusert i 1988, ble A320 det første kommersielle jetflyet som brukte et fullt digitalt fly-by-wire (FBW) kontrollsystem, som betydelig forbedret flyets håndtering, sikkerhet og automatisering. Dette systemet erstattet tradisjonelle mekaniske kontroller med elektroniske signaler, noe som reduserte arbeidsbelastningen for pilotene og tillot mer presise kontrollinnspill. Kombinert

med avansert aerodynamikk og større gassturbiner for bedre drivstoffeffektivitet, gjorde A320 til en favoritt blant flyselskaper som opererer korte til mellomlange ruter.



Figur 2: Airbus A320 neo-familien har flere oppgraderinger fra den opprinnelige A320 med sharklets på vingene, nye motoralternativer og flere oppdateringer i flykroppen og kabinen (bilde: Airbus).

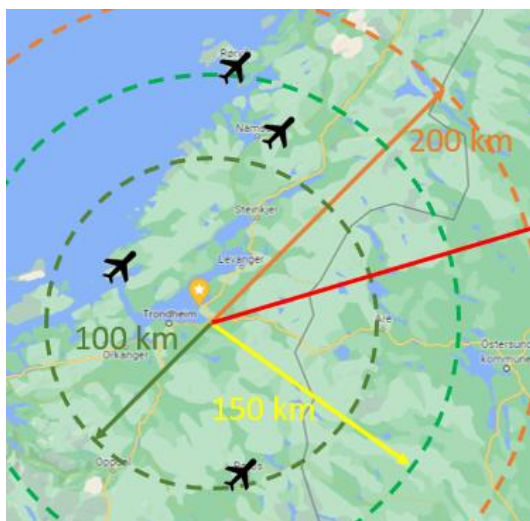
3.2.2 Boeing 737

Boeing 737 er et av de mest produserte og velkjente kommersielle flyene i verden. Den ble først introdusert i 1968 og har siden vært ryggraden i mange flyselskapers flåter, spesielt for kort- og mellomdistanseflygninger. Gjennom flere tiår har Boeing kontinuerlig utviklet og forbedret 737. Ulike varianter har blitt lansert for å møte flyindustriens krav til større passasjerkapasitet, lavere drivstofforbruk og for å konkurrere med Airbus. Den nyeste versjonen, Boeing 737 MAX, har vært en stor teknologisk oppgradering.



Figur 3: Boeing 737NG, med winglets (de bøyde vingtuppene), nye CFM motorer, nye materialvalg og andre oppgraderinger sammenlignet med den opprinnelige 737 fra 1968 (bilde: Boeing).

3.3 Avstander mellom lufthavnene i Trøndelag



Figur 4: Avstander mellom flyplassene i Trøndelag.

Flyplassene som er hovedfokuset for denne rapporten, er flyplassene i Trøndelag. De har forholdsvis liten avstand mellom seg. I Figur 4 er rekkeviddesirkler tegnet på et kart for å vise forskjellige rekkevidder med utgangspunkt i Værnes lufthavn.

Kartet viser at et fly med en rekkevidde så kort som 71 km er det som kreves for en testflyging mellom Værnes og Ørlandet lufthavn, eller 100 km som er avstanden til Røros lufthavn.

Avstanden for å fly til Namsos er 117,6 km. Den korteste avstanden er mellom Namsos og Rørvik. Den er bare 46 km og kan være et utmerket utgangspunkt for en testflyging av elektriske fly. Det er kort avstand mellom flyplassene og en testflyging skulle ikke være i

veien for normal trafikk siden det bare flyr et fåtall fly per dag fra lufthavnene.

3.4 Fly i utvikling og forutsett rekkevidde for elektriske fly

Avhengig av hvilken produsent og utvikler som først oppnår en sertifisert løsning, forventes flyet å ha en rekkevidde fra 200 km og opp til 400 km. Forskjellige bedrifter har oppgitt ulik rekkevidde med Tecnam P-Volt, med den laveste på omtrent 160 km. Hva rekkevidden blir når flyene er klare er vanskelig å si siden de er estimert med en lengre rekke forskjellige antakelser til grunn.

Tabell 4: Oversikt over utvalgte elektriske og hybride fly under utvikling, med estimert rekkevidde og passasjerkapasitet.

Produsent	Rekkevidde [km]	Pax
Eviation Alice	463	9
Ampaire Electric EEL - hybrid	740+	3
Tecnam P Volt	160	9
Lilium Jet	300	6
Vertical VX4	185	5
Heart ES-30 (electrical/hybrid)	200/400	30
Beta EVTOL/CTOL	200/400	5

De fullelektriske flyene har sammenlignet med fossildrevne fly kort rekkevidde, fra 185 til 463 km. Ampaire Electric EEL er et hybridfly som har en gassturbin som drives med flytende drivstoff for å få opp rekkevidden, dette flyet kan derfor ikke rettferdig sammenlignes med de andre flyene. Heart Aerospace har på sin hjemmeside valgt å oppgi flere rekkevidder avhengig av batteriteknologi og hvis det er hybriddrift eller ikke.

I 2024 fikk prosjektet høre om en ny aktør, Beta, som har testflydd sine batterifly. Bedriften er amerikansk og ligger veldig langt fremme. De har testet sitt fly med bare batteri som energilagring og er flytypen som er tiltenkt å brukes på strekningen Bergen – Stavanger.

Configurations

ALIA A250 VTOL
Vertical takeoff & landing
all-electric aircraft



ALIA CX300 CTOL
Conventional takeoff & landing
all-electric aircraft



WINGSPAN	50 ft	50 ft
CARGO CAPACITY ①	200 ft³	200 ft³
PASSENGER CAPACITY ①	5 Passengers	5 Passengers
CHARGE TIME ①	<1 hr	<1 hr
LANDING LOCATIONS	Airports, Vertiports	Airports
PILOTING	Single Pilot, Instrument Flight Rules capable	Single Pilot, Instrument Flight Rules capable
TRAINING	Dual Pilot Configuration	Dual Pilot Configuration
PROPULSION	One H500A Electric Motor Four V600A Electric Lift Motors	One H500A Electric Motor
MAX CRUISE SPEED	135 kts	135 kts
MAX DEMONSTRATED RANGE		336nm
PROPELLER	One 5-Blade Fixed Pitch Propeller Four 2-Blade Lift Propellers	One 5-Blade Fixed Pitch Propeller

Figur 5: Beta sine to planlagte flykonfigurasjoner, vertikal landing (VTOL) og konvensjonell landing (CTOL).

Heart Aerospace oppgir på sine hjemmesider⁸ at de har som mål å typesertifisere flymodellen ES-30 i 2029 med hybrid fremdrift (kombinasjon av forbrenning og batteri som energilagring). Tidligere oppga nesten alle utviklere av elektriske batterifly at de har satt 2026 som sertifiseringsår. Å sertifisere nye flytyper og nye fremdriftssystem uten ferdige regelverk har resultert i at mange har blitt forsiktig med å oppgi konkrete datoer, eller har flyttet måldatoene sine flere år frem i tid.

Normal prosedyre er at regler utvikles av myndigheter (EASA, den europeiske sertifiseringsmyndigheten for fly) sammen med bedriftene der det skapes enighet i hva som må verifiseres i tester, simuleringer og testflyginger. Gjennomføringen av denne prosessen tar ofte år, og når helt nye produkter i tillegg skal utvikles å oppfylle flyindustriens ekstremt høye sikkerhets og pålitelighetskrav blir det en både dyr, vanskelig og tidskrevende oppgave. Alt dette peker på at det ikke er sannsynlig at det finnes fly tilgjengelig før 2028 og mer sannsynlig tidligst frem mot 2030, større fly som kan direkte erstatte de flyene som brukes i dag kommer å ta enda lengre tid. På bakgrunn av disse beregningene kan det etableres tidsrammer for når vi kan forvente oss at infrastruktur og reguleringer må være ferdige i Norge.

Det er også sannsynlig at de første flyene kommer å være hybrider, det vil si en kombinasjon mellom forbrenningsfly og alternative energilagringmåter, som batteri og hydrogen. Trenden de seneste årene har vært tydelig: flere utviklere går fra batterier som energilagring mot hybrider og hydrogen med brenselceller for omvandling til elektrisitet. Eksempel er Heart Aerospace, Universal Hydrogen og grunnen til dette er at batterier ikke er energitette nok. Det vil si at de veier for mye i forhold til energimengden de kan lagre. En forventning blant mange utviklere har vært at batteriene skal forbedres fort, særlig siden batterier nå brukes mye i både biler og andre typer kjøretøy. Men denne utviklingen har ikke startet ennå, en stor mulighet er faststoffbatterier som har potensialet til å mer

⁸ <https://heartaerospace.com/es-30/>, 14/10/2024

enn doble energitettheten sammenlignet med Li-ion batterier med flytende elektrolytt som i dag brukes i alt fra elektriske biler, busser og mobiltelefoner.

Det finnes prototyper av faststoffbatterier i laboratorier med meget lovende energitetthet. Den store utfordringen er å skalere opp produksjonen til industriell skala sånn at prisen blir lav og kan begynne og brukes kommersielt. De første produktene som bruker batterier med faststoffteknologi, har kommet på markedet i juli 2024 med små og portable batteribanker for privat bruk fra en bedrift som heter Yoshino. Men det er vanskelig å finne mer detaljert informasjon om energitettheten i selve batteriet for å utføre en sammenligning med dagens spydspissteknologi som bruker flytende elektrolytt. Hvis man tar vekten på hele produktet, med skjermer, ladeinnganger og utganger, selve skallet og alt blir energitettheten omtrent 100 Wh/kg. Denne tettheten tilsvarer omtrent halvparten av hva bilprodusenter som Tesla oppgir med flytende elektrolytt. Men det er vanskelig å gjøre en rettferdig sammenligning ettersom det ikke er oppgitt hvor mye som ikke er en del av selve batteriet i produktvekten. Hvordan produksjon og utvikling innenfor fagfeltet faststoffbatterier faktisk ligger an, må rett og slett følges opp når flere produkter kommer på markedet og når mer informasjon blir åpent tilgjengelig for et større publikum. Tiden vil her utvise hvorvidt batterier er en reel energibærer for fly i fremtiden, hvor lang rekkevidde de kan gi og hvor store fly de klarer å forsyne med energi.

3.5 Hvor mange konvensjonelle fly kan erstattes av utslippsfrie alternativer?

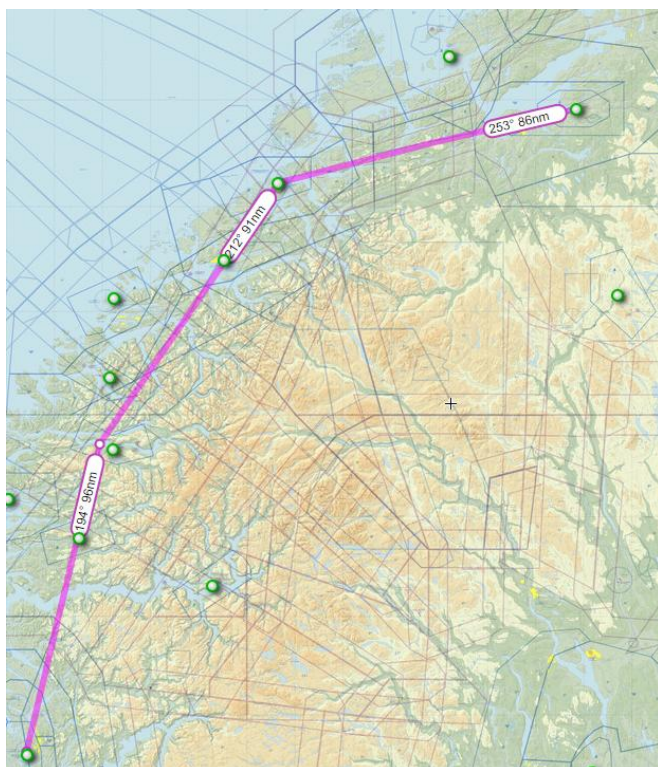
Det enkleste svaret på dette spørsmålet er at ved alle flyvinger elektriske fly har tilstrekkelig rekkevidde til å klare, kan konvensjonelle fly erstattes. Men det forutsetter at man bruker flynettverket på samme måte som i dag, det vil si en måte å bruke flyene på som er utviklet for konvensjonelle forbrenningsfly som ofte har mye lengre rekkevidde enn nye elektriske og hybridfly forventes å ha. Dagens operatørselskap bygger sin forretningsmodell på at flyene er meget fleksible og har lengre rekkevidde enn hva som kreves for de fleste flyvingene. Dette må forbedres for å oppnå et bredt gjennomslag for batterifly.

Dette spørsmålet er egentlig veldig stort siden man ikke må fly på samme måte som i dag med utslippsfrie fly. For å tilgjengeliggjøre flyvinger med fly som sammenlignet med dagens fly har tekniske begrensninger i rekkevidde kreves nye bruksmønstre. Måten man flyr på i dag er basert på teknologien som finnes tilgjengelig, altså fly som sammenlignet med batterifly har veldig lang rekkevidde, noe som gir flyoperatørene stor fleksibilitet. For å vise på et hypotetisk eksempel som skulle kunne være en ny måte å fly mellom Trondheim og Bergen på med batterifly, følger her et eksempel.

Vi gjør følgende antakelser (antakelsene er tatt fra et gjennomsnitt av noen småfly som var under utvikling i 2024, tenkt for omtrent 7-9 passasjerer):

1. Elektrisk fly med batterier som energibærer
2. Kapasitet på 7-9 passasjerer
3. Rekkevidden for flyet er 200 km
4. Hastigheten vi flyr med er i gjennomsnitt 200 km/t

Hvor sannsynlige disse antakelsene er sammenlignet med de produktene som kommer å nå markedet først vil bli tatt opp diskuteres mer detaljert senere i rapporten.



Avstanden mellom Trondheim og Bergen er cirka 463 km. Så langt kan ikke et elektrisk fly reise uten mellomlanding, så vi tvinges derfor til å lande to ganger på veien. For å sikre at flyet når helt frem til flyplassene uten å tømme batteriene (vi tar ikke med hvordan reserve fungerer eller hvor stor den skal være her for å forenkle og vise på prinsippene), er et forslag å mellomlande i Kristiansund og Sandane. Den første delen av reisen forventes da å ta omtrent 50 minutter. Hurtiglading tar 20 minutter, etappe 2 til Sandane tar også omtrent 50 minutter. Nok en lading tar 20 minutter og siste etappe til Bergen tar også 50 minutter. Den totale reisetiden blir da 3 ganger 50 minutter og 2 ganger 20 minutter lading, totalt 3 timer og 10 minutter.

Kjørestrekningen Trondheim til Bergen tar ifølge google maps omtrent 10 timer. Skal

bilreisen være utslippsfri forventes det at man også må ha et ladestopp for bilen siden avstanden er 659 km, hurtiglading av en bil gjør at omtrent 15 minutter må legges på reisetiden. Det er også nødvendig å ta noen pauser for å unngå for lange kjøreperioder. Sammenligningen er forenklet på mange måter og det finnes mange variabler som bevisst ikke er tatt med for å lage et enkelt og tydelig eksempel. Poenget er å vise at det absolutt kan være interessant med elektriske fly selv om de må mellomlande på veien for å lade. Men det viser også at man må gjøre en analyse for hver enkelt strekning man ønsker å introdusere elektriske fly ettersom man må mellomlande på eksisterende flyplasser og avstanden må tilpasses start og sluttmaal for flyvingen. Men det må også noteres at sammenlignet med direktefly som tar 1 time eller via Oslo som tar to timer og 55 minutter⁹

Fly med en rekkevidde som bare gir ett stopp, vil ha en enda større fordel. Men sammenlignet med en flytid for en Boeing 737 som tar omtrent en time, vil utslippsfrie batterifly ta lengre tid. Grunnen er at utslippsfrie småfly må stoppe minst en gang og i tillegg flyr med lavere hastighet.

Hadde man brukt en annen teknologi for flyets fremdrift hadde det stilt andre krav. Et alternativ hvor man kunne brukt det eksisterende Dash 8-100-flyet uten noen endring av hvordan man flyr mellom Trondheim og Bergen på, er å bytte brensel til SAF (e-fuel). Et syntetisk drivstoff fremstilt av hydrogen og kull i en Fisher-Tropsch prosess. Men da må man ha omfattende produksjon og infrastruktur for dette i Norge. Dette er nærmere beskrevet i «Veikart for e-fuels i Trøndelag»¹⁰.

Det går uansett å konkludere med flere ting som er gjeldende for utslippsfrie fly med begrenset rekkevidde sammenlignet med hvordan konvensjonelle fly operer i dag.

1. Begrenset rekkevidde krever mellomlandinger for lengre flyvinger.
2. Mindre flyplasser kreves for mellomlandinger langs de mest populære rutene i dag.
3. Hurtiglading/batteribytte kreves på alle flyplasser.

⁹ Flytidene er tatt fra sas.no

¹⁰ Veikart for e-fuels i Trøndelag, RENERGY, https://renergycluster.no/hubfs/veikart_for_efuels.pdf?hslang=no

4. Flyene kommer til å være mindre enn de som flyr i dag på de mest populære rutene.
5. Mindre fly krever flere fly og flere avganger sammenlignet med i dag.
6. Mange flere piloter enn i dag kreves for å operere et høyere antall fly (like mange piloter per fly som i dag, og flere fly i omløp).

3.6 Hvor mange flyr i dag innenriks i Norge?

På grunn av den unike norske geografien med mange fjorder og høye fjell, som fører til at bilveier ofte må legges rundt en fjord eller kreve en eller flere ferger for å ta seg forbi, gjør at fly er populært siden det vil være tidssparende. Av de elleve mest populære flyrutene i Europa er fire i Norge i 2021.

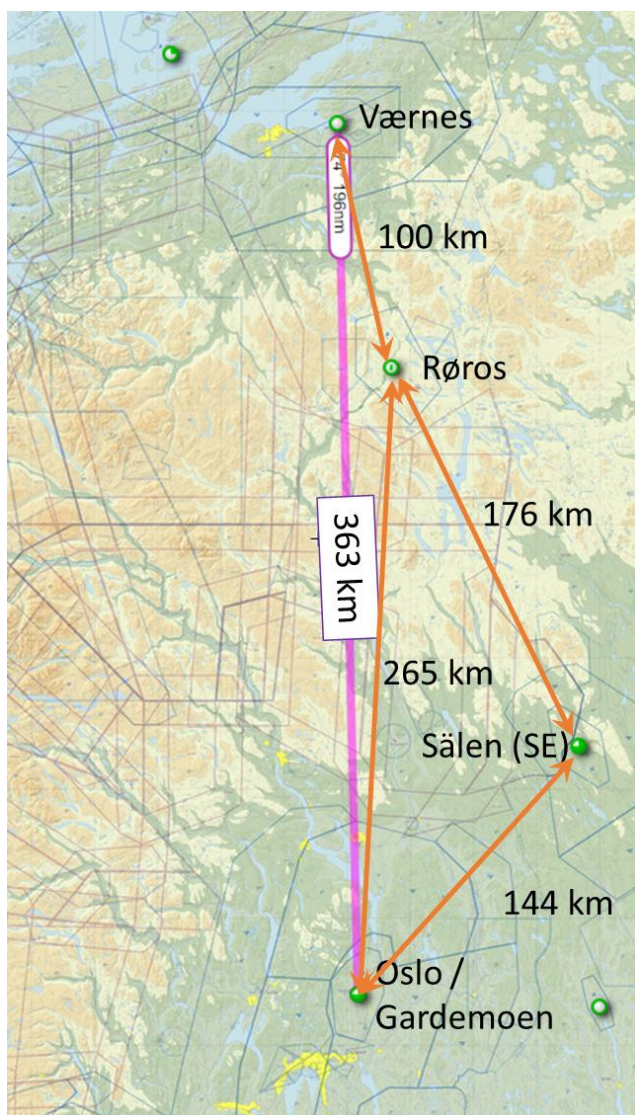
Tabell 5: Liste over Europas mest populære flyruter i 2021.

#	Flyplass 1		Flyplass 2		2021	Avstand [km]
1	Madrid / Barajas		Palma de Mallorca		1,140,759	576
2	Roma / Fiumicino		Catania		1,060,641	661
3	Madrid/Barajas		Barcelona/El Prat		1,013,020	505
4	Oslo/Gardermoen		Trondheim		1,005,775	363*
5	Oslo/Gardermoen		Bergen		991,026	325*
6	Madrid/Barajas		Gran Canaria		937,084	1,968
7	Madrid/Barajas		Tenerife Norte		875,428	1,945
8	Athens		Thessaloniki		826,643	502
9	Oslo/Gardermoen		Stavanger		785,512	342*
10	Rome/Fiumicino		Palermo		741,588	515
11	Oslo/Gardermoen		Tromsø		722,576	1,118*

De to mest populære flyrutene i Norge er veldig korte sammenlignet med mange av de andre på listen. På tross av de korte avstandene, er de fortsatt sannsynligvis for lange for batterifly. De fire mest populære rutene transporterer omtrent 3,5 millioner passasjerer i året, dette gir en stor mulighet for å redusere utslipp med ny teknologi.

3.7 Endrede flymønster grunnet begrenset rekkevidde

Transportering av mennesker mellom to steder med lengre avstand enn et fly har rekkevidde, vil kreve mellomlandinger. Derfor er et sentralt spørsmål hvordan man kan fly de fire mest populære flyrutene med utslippsfrie fly som har begrenset rekkevidde. Gjennom studier av de mest populære flyrutene i Norge ser man både muligheter, problem og behov for enda flere flyplasser. I disse eksemplene kommer vi til å ta utgangspunkt i fly som har kort rekkevidde siden de bare bruker batteri som måte for energilagring. Dette er det mest begrensende fallet vi kan tenke oss, men som også krever størst endringer i bruksmønster for flyene. Om det er økonomisk lønnsomt eller ikke krever mer informasjon og de hypotetiske forslag som fremlegges kan brukes/sees på som en hjelp og som et tankeeksperiment for nye bruksmønster langs de mest populære rutene i Norge.



Figur 6: Flyruten Trondheim - Oslo (Værnes - Gardemoen).

Noen prinsipper som kommer til å påvirke et batterifly:

1. Et fly bruker mest effekt ved start og landing, dette betyr mindre energi for å fly til neste flyplass.
2. Lading tar tid, derfor vil flere ladestopp øke totale reisetid.
3. Å tømme batteriet helt sliter mye mer på batteriet enn å holde seg innenfor 20-80 prosent ladekapasitet, dette vil ha stor påvirkning på operasjonskostnadene.
4. Det forutsettes at det er godkjent å lade batteriene med passasjerer om bord for å spare tid.

3.7.1 Oslo – Trondheim

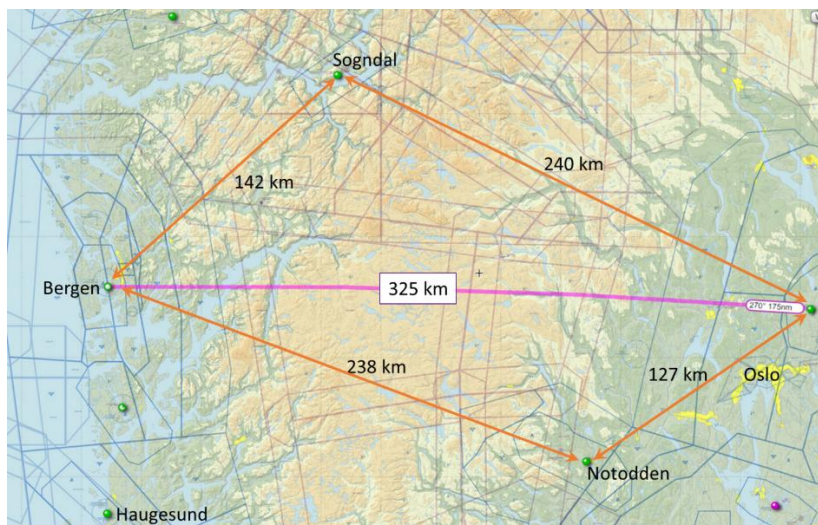
Oslo - Trondheim er 363 km hvis man flyr direkte, den korteste veien fra Værnes til Gardemoen. Over fjellene finnes det ikke mange flyplasser som kan brukes for mellomlandinger. For å dekke denne flyruten kreves en rekkevidde på 180 km, med dagens infrastruktur kreves en mellomlanding på den lille flyplassen Sälen (Scandinavian Mountains Airport) i Sverige i tillegg til Røros. Det finnes ikke noen ekstra flyplasser for uforutsette nødlandinger og lignende på norsk side av grensen på nåværende tidspunkt. Med et fly med en rekkevidde på 265 km eller mer, kreves bare en mellomlanding i Røros.

For å transportere de omtrent én million passasjerene som flyr ruten hvert år, kreves (hvis flyene tar 10 passasjerer), 100 000 flyavganger. Flyene som går mellom Trondheim og Oslo i dag tar mellom 140-200 passasjerer. For å dekke dagens reisebehov vil det bety en enorm økning av antallet flyavganger. For å erstatte et fossilt fly med høy passasjerkapasitet kreves det mange småfly. Økt antall avganger vil gi økt fleksibilitet til passasjerene, men krever også flere piloter og økt flytrafikkontroll for at flere fly skal være i stand til å benytte luftrommet over Dovre.

Det viser også at et utslippsfritt fly kan tas i bruk på denne flyruten selv med en rekkevidde på 180 km. Med en rekkevidde på 280 km kreves bare en mellomlanding i Røros. Mellom landing ved en i dag veldig lite trafikkert flyplass som Røros flyplass vil der føre til en stor økning i trafikk, en enorm økning i strømbehov for å lade fly som kommer som en direkte effekt av en stor utvidelse av flytrafikken. Selv uten å vite hvilken teknologi flyene kommer med er det i dag vanskelig å vite nøyaktig hvor stort og hva behovet blir siden det også kan bli ved benyttelse av hydrogen. Nettsituasjonen i Røros er i dag allerede anstrengt og er avhengig av hovedforsyning fra sør som er værutsatt, noe som leder til flere strømvavbrudd i året. Effektsituasjonen kommer også å bli helt forandret for å få dette til og kommer å kreve meget store investeringer i forsterket nett for å kunne realiseres.

3.7.2 Oslo – Bergen

Oslo – Bergen går også over et fjellområde som tilsvarer en bilreise på omtrent 7 timer. Flystrekningen er 140 km kortere enn bilveien og er 325 km lang.



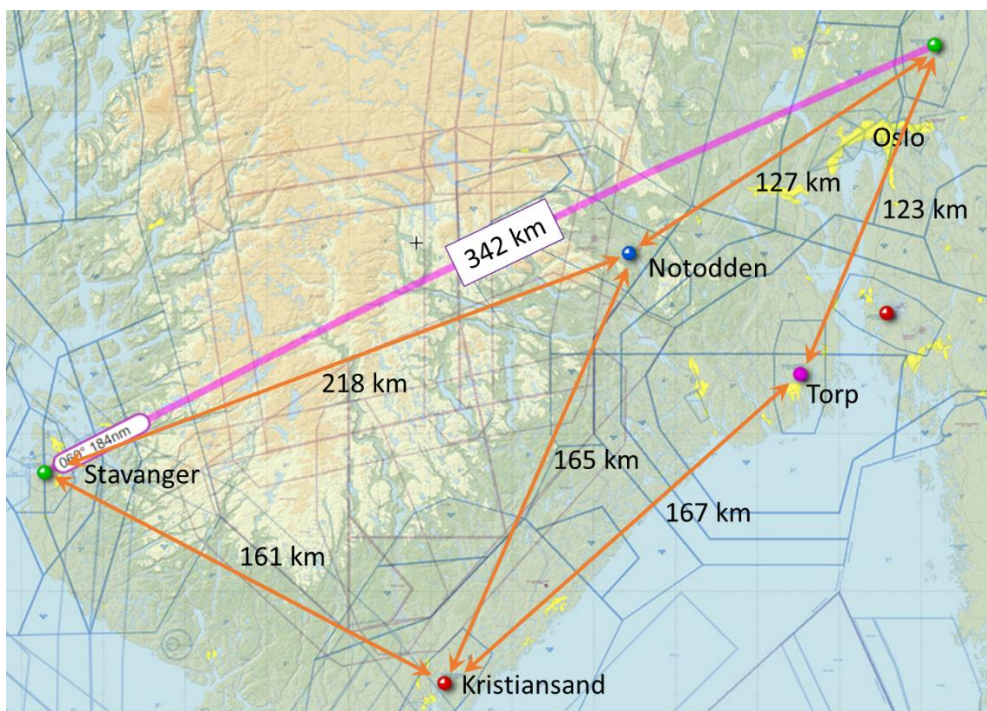
Figur 7: Flyruten Bergen – Oslo (Flesland - Gardermoen).

Problemet mellom Bergen og Oslo er at det ikke eksisterer noen naturlige mellomlandinger lokalisert omtrent ved halve avstanden til flyplassene. Ruten kan deles opp gjennom å bruke Sogndal eller Notodden flyplass. Men det krever fortsatt en rekkevidde på 240 km for å klare å bruke dem på ruten Oslo – Bergen. Sammenlignet med de andre rutene analysert i denne seksjonen av rapporten er dette ruten som krever lengst rekkevidde av et utslippsfri fly, omtrent 240 km. Men det er ikke urealistisk å klare hele ruten med videreutvikling av batterienes energitetthet. Beta sier selv i en artikkel¹¹ at A250 kan fly 460 km og produksjonsvarianten CX300 skal kunne fly 620 km. Her må man også tenke på at en del av denne rekkevidden må vies til reserve og andre sikkerhetsrelaterte formål.

3.7.3 Oslo – Stavanger

Oslo-Stavanger er litt lengre enn Bergen-Oslo, men har en flyplass på andre siden av de store fjellene og i tillegg å fly via Kristiansand som en reservemulighet, men det krever da to mellomlandinger. Med en mellomlanding kreves en rekkevidde på 220 km. Med to mellomlandinger og flyrute via Kristiansand og Notodden kreves en rekkevidde på 165 km. Hvis Torp brukes istedenfor Notodden er det et lignende scenario som via Notodden.

¹¹ [https://evtol.news/news/beta-goes-the-distance#:~:text=The%20A250%20\(originally%20called%20the,the%20state%20this%20past%20March.](https://evtol.news/news/beta-goes-the-distance#:~:text=The%20A250%20(originally%20called%20the,the%20state%20this%20past%20March.)



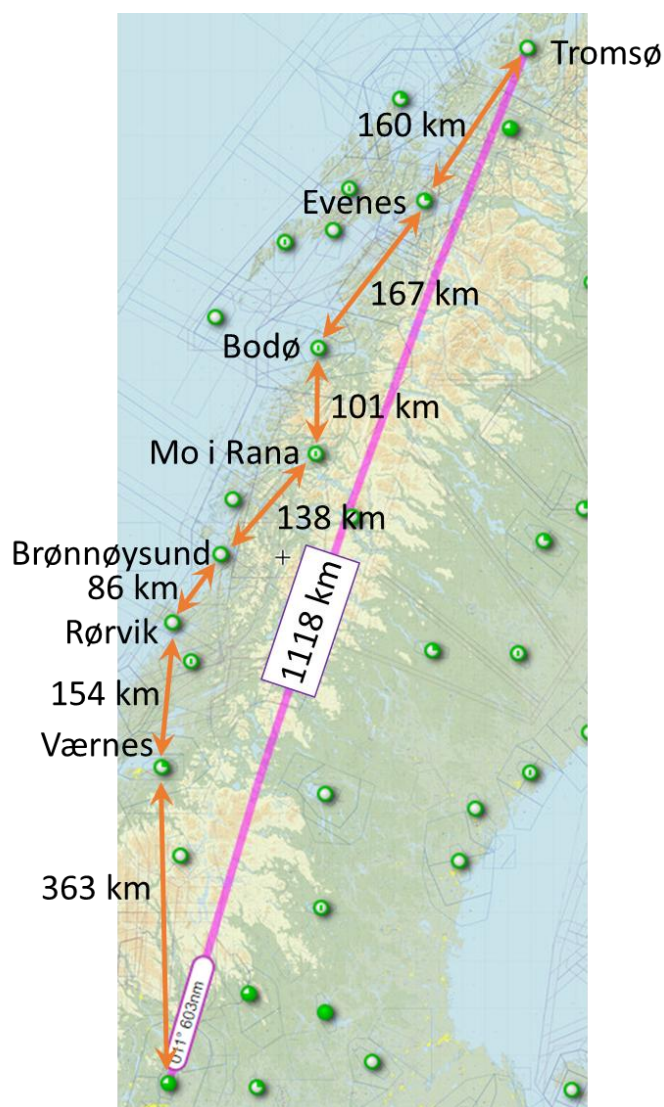
Figur 8: Stavanger – Oslo (Sola - Gardermoen), med alternative ruter med mellomlandinger.

Man kan se i Figur 8 at en rekkevidde på 218 km kreves for å fly turen med bare en mellomlanding. Det forventes å ta omtrent 2,5 time i fly og ladetid med et stopp og i hvert fall nok en time med to ladestopp. Dette er fortsatt kortere tid sammenlignet med bil og tog som tar omtrent 7 timer. Men da skal det også tillegges at i flyreisetiden er ikke tid for sikkerhetskontroll, sjekk-inn, bagasjelevering, reise til/fra flyplass og lignende inkludert.

3.7.4 Oslo – Tromsø

Oslo-Tromsø er en forholdsvis lang strekning med sine 1118 km. Det er for konvensjonelle fly ikke noe problem, selv hvis det skulle være ugunstig vær og reserver tatt med i beregningen. Alle fly som brukes på de norske flyplassene, både innland og utland klarer denne strekningen uten problemer. Men for elektriske fly må den deles opp i mange deler, avhengig av hvor lang rekkevidden for flyet er.

Oslo – Tromsø er en rute som skiller seg litt fra de andre, mest på grunn av at den er lengre og blir mer kompleks å få til med fly som har begrenset rekkevidde. Med mange flyplasser på passelig avstand langs kysten finnes det mange muligheter, men det vil bli behov for mange mellomlandinger og mye lading av batteri. Det er nok med en rekkevidde på 160-170 km for å klare turen fra Værnes til Bodø, men det krever omtrent 3 mellomlandinger og ladestopp. Mellom Tromsø og Bodø er det beste alternativet å stoppe i Evenes som ligger nesten mitt mellom Bodø og Tromsø. Ifølge Google Maps tar det omtrent 22 timer å kjøre mellom Oslo og Tromsø. Hvis man antar at det tar en omtrent en time per del-strekning med et elfly, inkludert lading, forventes det å ta 8-10 timer med elfly fra Oslo til Tromsø. Dette er fortsatt en stor tidsbesparing (uten logistikk til/fra flyplass og på flyplass med innsjekk og sikkerhetskontroll og lignende), men mye lengre reisetid enn med dagens rutefly. Med dagens rutefly som kan fly strekningen direkte på omtrent 2 timer.



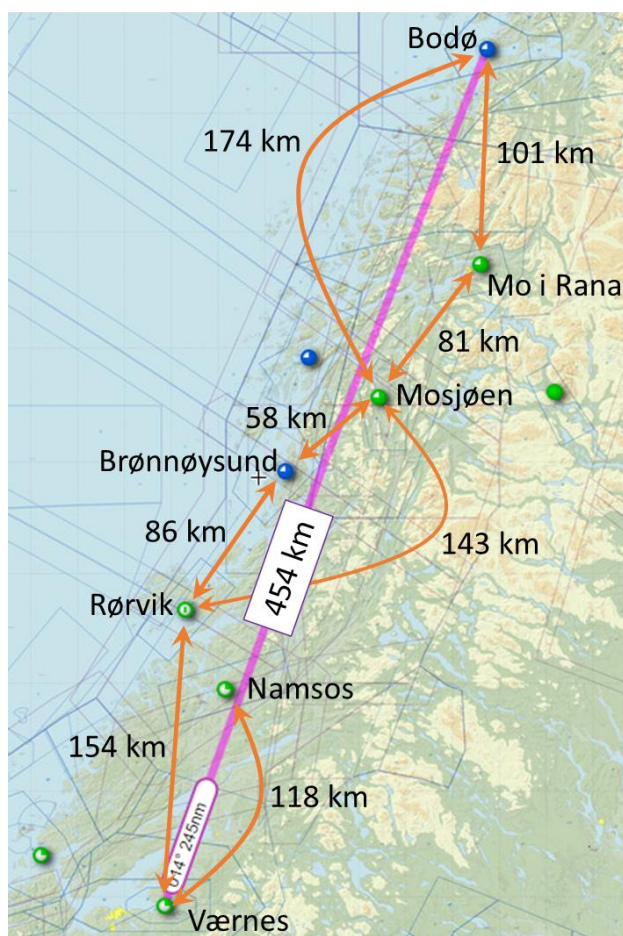
Figur 9: Den lange flyruten fra Oslo til Tromsø med mulige mellomlandinger merket på kartet.

Som man ser i Figur 9 finnes det mange flyplasser fra Værnes og nordover man kan bruke for mellomlandinger. For kort tid ønsker man selvsagt å lande og lade så få ganger som mulig.

Forutsatt at flyet har rekkevidde på 167 km for å klare turen mellom Bodø og Evenes finnes det mange alternativer på veien. Derfor er det bare et spørsmål om hvor mange mellomlandinger man ønsker og hvor det er gunstig å lande. Dette kan være avhengig av hvor man skal slippe av og hente passasjerer og gods. Men takket være den gode fordelingen av flyplasser så forventes det ikke å være et problem.

Det kommer selvsagt å kreve at mange flyplasser må forsynes med lademuligheter og, hvis det er nødvendig, også få forbedret strømnnett for å klare å lade med stor effekt. Et forbedret strømnnett vil være ekstra viktig når det bli mange mellomlandinger/ladelandinger på grunn av lang totaldistanse.

3.7.5 Trondheim – Bodø



Figur 10: Delstrekningen Trondheim - Bodø med mulige mellomlandinger.

Trondheim til Bodø blir en delstrekning av den lengre turen mellom Trondheim og Tromsø. For å påvise at det finnes flere alternativer er det derfor tegnet inn litt andre flyplasser og alternativer. Hele strekningen er 454 km fra Værnes til Bodø.

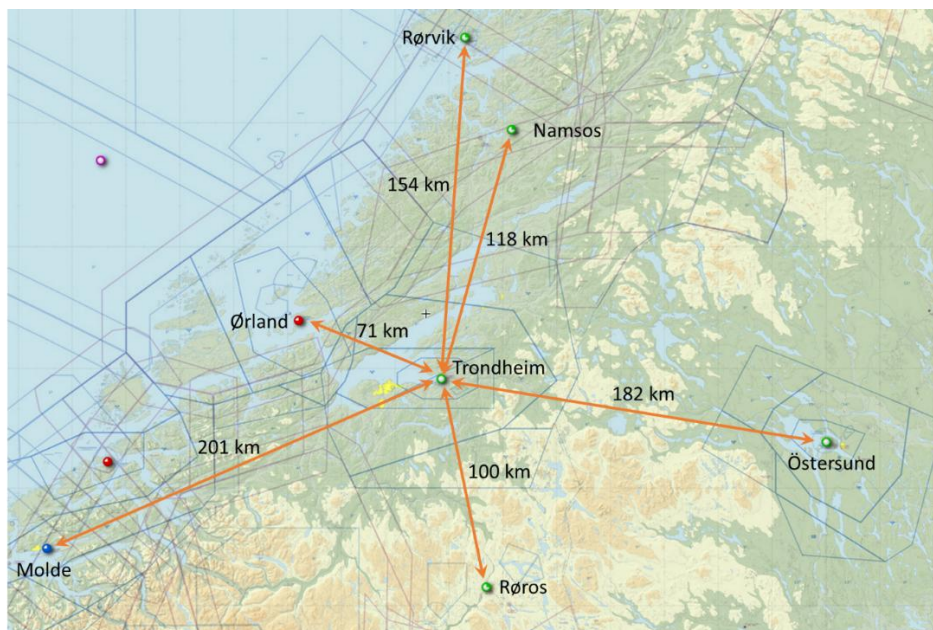
Vi ser tydelig at det finnes mange mulige alternativer og kombinasjoner for å ta seg med elfly mellom Trondheim (Værnes) og Bodø, forutsatt at rekkevidden er minimum 154 km. Hvis flyet har en rekkevidde på 174 km kreves bare to mellomlandinger for lading i Rørvik og Mosjøen. En flyvning med to mellomlandinger forventes totalt å bruke litt over tre timer inkludert hurtiglading. Flyturen kan sammenlignes med å kjøre bil der ruten ifølge Google Maps vil ta 9 timer og 35 minutter. Flyturen vil altså bespare omtrent 6 timer sammenlignet med å kjøre bil. Et rutefly i dag har en flytid på 1 time, så flere mellomlandinger gjør selvsagt at man mister ganske mye tid. For å klare flyturen med bare en mellomlanding så kreves en rekkevidde på 282 km som er nødvendig for å kunne fly hele veien fra Værnes til Mosjøen.

I en sammenligning mellom fly og bil må det tillegges at det ikke er innregnet tid for transport fra Trondheim sentrum til Værnes og fra Bodø flyplass inn til sentrum. Her må det påregnes nok 1 time og 30 minutter, noe som gjør at reisen med konvensjonelt fly tar omtrent 2 timer og 30 minutter og med elfly omtrent 4 timer og 30 minutter.

Konklusjonen er at det kommer å ta lengre tid med elfly som krever lading og mellomlandinger på litt lengre flyvinger sammenlignet med konvensjonelle fly, men det finnes mye både tid og utslipp å spare med elfly eller andre utslippsfrie løsninger sammenlignet med å kjøre bil.

3.8 Kortbanenettet i Trøndelag og omheng – mulighet for vinterturisme

Hvis vi utgår fra Værnes som knutepunkt og ser på avstanden til nærliggende flyplasser, er en rekkevidde på 201 km (for flyving til Molde og videre mot Bergen for eksempel).



Figur 11: Avstand fra Værnes til de ulike flyplassene i Midt-Norge som kan bli aktuelle for utslippsfrie fly.

Det finnes gode muligheter for å bruke utslippsfrie fly for vinterturisme med utgangspunkt i Værnes som en hub for videre transport til vinterturismemål. Aktuelle plasser kan være Røros, Åre med fly til Østersund flyplass eller Oppdal. Alle disse stedene er populære plasser for vinterturisme og med avstand som er under 182 km fra Værnes kan dette mest sannsynlig dekkes av utslippsfrie småfly når de blir kommersielt tilgjengelige.

3.9 Hvilken rekkevidde kreves for å dekke alle strekninger

Basert på de mest populære innenriksrutene kan vi se at mange av de kan dekkes med en rekkevidde på 175 km. Men for å fly for eksempel Oslo – Bergen og Oslo-Stavanger kreves en rekkevidde på 240 km. Grunnen til kravet på lengre rekkevidde baserer seg på at det finnes få flyplasser i fjellene mellom Oslo og Vestlandet. Selvsagt er så lang rekkevidde som mulig det beste siden det gir flyoperatørene mer fleksibilitet og ikke krever mellomlandinger.

Noe som virkelig hadde åpnet opp store muligheter for elfly er hvis rekkevidden kan bli 363 km, da kan alle de største rutene flys uten ladestopp:

1. Oslo – Trondheim
2. Oslo – Bergen
3. Oslo – Stavanger

Lengre nordover kunne man også flydd fra Trondheim til både Bodø med ett ladestopp, og videre til Tromsø med bare ett ladestopp. Neste kapittel ser på hva status er for å gi en forståelse gjeldende hva som er rimelig å forvente i tillegg til hva potensialet er hvis batteriteknologien, som er den rekkeviddebegrensende teknologien, utvikles som forventet med faststoffbatterier eller annen teknologi.

3.9.1 Forbedret tilgjengelighet på mindre flyplasser med nye bruksmønstre

Hvis mellomlandinger kreves, øker reisetiden siden batterier må lades, passasjerer gå av og på og andre ting som tar tid og må legges til reisetiden. Det samme gjelder hydrogen som også trenger å fylles, men å fylle hydrogen forventes å gå fortere enn å lade batterier. Det kommer også å gi økt antall flyavganger fra de flyplassene hvor mellomlandingene skjer. Dette kan være positivt for de mindre byene og områdene som ligger mellom de større flyplassene i hele landet.

Hvis mellomlandinger skal foregå på mindre flyplasser som i dag har begrenset med aktivitet, betyr dette at både ny infrastruktur som ladeplasser må opprettes og driftes, dette skaper både økte kostnader og nye arbeidsplasser. Ny infrastruktur kan gi betydelig økt tilgjengelighet da det også vil gi passasjerer muligheten til å gå av og på om bord i flyet mens det lader. Denne løsningen forutsetter at det finnes flyplasser i drift langs hele flyruten. Her vil det være god mulighet for samarbeid mellom operatører, Avinor, myndigheter og flyprodusenter for å maksimere reduksjon av utslipp. Denne rapporten utforsker mulighetene for litt flere ruter for å påvise typiske konsekvenser med predikerte data for fly som kan komme til å bli kommersielle de nærmeste 5 til 10 årene.

3.10 Status på den elektriske flyutviklingen – hva er realistisk rekkevidde?

I løpet av prosjektet har det skjedd en utvikling fra mange bedrifter og en forventet introduksjon av små batterifly i 2026-2027, til en konsolidering av markedet hvor mange startups har gått i konkurs, forskyvet datoene for markedsintroduksjon eller gått over til hybride fremdriftssystemer.

Eksempel på dette er for eksempel Rolls Royce som har forlatt utviklingen av elektriske fremdriftssystemer, både Heart Aerospace og Wright Electric har gått fra batteri som energilagring til hybrid fremdrift. Andre eksempler er Tecnam P-Volt som ble forlatt som konsept, Lilium med over tusen ansatte gikk i konkurs i 2024 og Universal Hydrogen som satset på hydrogen som energilagring og gikk konkurs i 2024. De store utviklerne som Boeing og Airbus har offisielt sagt at de satser mot større fly med hydrogen som energilagring, men deres konsept kommer tidligst mot slutten av 2030-tallet. Estimert tidspunkt for konseptfullføring vil være for sent til å nå klimamål mot både 2030 og 2040 ettersom flyflåter tar lang tid å bytte ut da fly er designet for omtrent 25 års levetid.

Det skjer mye utvikling innenfor faget elektriske fly og fremdriftssystemer. Innenfor begrepet elektrisk inkluderes både batterier og brenselceller med hydrogen som energilagringssystem, men ikke fremdriftssystem som bygger på forbrenning av for eksempel fornybart drivstoff som SAF eller hydrogen. Det finnes også hybridsystemer som er elektriske, men kan produsere strøm via konvensjonelt drivstoff som brennes i en gassturbin som driver en generator og lager strøm for å forlenge rekkevidden.

I rapporten «Forslag til program for introduksjon av elektrifiserte fly», skrevet av Avinor, etableres forventningene som presenteres i Tabell 6. Tre og et halvt år senere har situasjonen endret seg. Det er enkelt utfra data å forstå at de har Heart Aerospace sin flymodell ES-19 i tankene. Denne flytypen ble for øvrig forkastet i 2022 som konsept, og erstattet med ES-30. Dette betyr at det opprinnelig tiltenke 19 passasjerers flyet blir litt større og er nå tiltenkt 30 passasjerer (modellnavnet peker på tiltenkt antall passasjerer). Tallene for rekkevidde og markedsintroduksjon er også oppdaterte når Heart Aerospace offentliggjorde denne forandringen. Alt dette er sammenlignet i Tabell 6.

Tabell 6: Sammenligning av data fra Avinors rapport fra august 2023 fra Heart Aerospace sin hjemmeside.

Kilde	Dato	Rekkevidde [km]	Pax	Markedsintro	Link	Flytype
Avinor	Jan 2020	350-400	19	2025-2030	link	Heart Aerospace ES-19, fullt elektrisk
Heart Aerospace	Aug 2023	200	30	2028	link	Heart Aerospace ES-30, fullt elektrisk
Heart Aerospace	Aug 2023	400	30	2028	link	Heart Aerospace ES-30, hybrid elektrisk
Heart Aerospace	Aug 2023	800	25	2028	link	Heart Aerospace ES-30, hybrid elektrisk

Som vi kan se er det hovedsakelig den batteri-elektriske rekkevidden som har gått ned. Grunnen til dette er sikkert at når de opprinnelige tallene ble satt opp forventet mange i bransjen en fortsatt utvikling i energitetthet for batterier og at bilindustrien kunne være en kapitalsterk driver for dette. Denne utviklingen har ikke skjedd, det har ikke kommet noen revolusjonerende nye battericeller med vesentlig høyere kapasitet enn de som var i markedet for noen år siden. Den forventede utviklingen av faststoffbatterier har ikke kommet som forventet og dermed har et stort skritt i energitetthetsutviklingen blitt forskjøvet inn i fremtiden, på ubestemt tid. I det siste har bilindustrien faktisk gått et skritt tilbake for å lage billigere batterier som ikke krever kobolt¹², et grunnstoff koblet til meget dårlige arbeidsforhold og store skader på lokalmiljø i tilknytning til dets gruvedrift.

Toyota har i et intervju med the Guardian¹³ peket på at faststoffbatterier kan komme på markedet som en sammenligning med Li-ion batterier forventes rekkevidden bli omtrent doblet og kan lades fullt på ti minutter med bedre sikkerhet sammenlignet med dagens batterier. Det er vanskelig å forutsi hvordan dette kan påvirke flymarkedet og hvordan markedet kommer å se ut, men forhåpentligvis er det bare et tidsspørsmål før ny teknologi forbedrer energitettheten. Men før de finnes på markedet i større skala er det vanskelig å forutse når de kan være tilgjengelige for fly. Flyteknologi kommer normalt sett flere år etter bilindustrien på grunn av de høye sikkerhetskravene i flybransjen som krever lange sertifiseringsprosesser sammenlignet med bilindustrien. Det er også vanskelig å forutse hvordan batteriutvikling og produksjon, som i dag domineres av Kina påvirkes av det globale tollkrigen som pågår. Det er mange faktorer som gjør at det er meget vanskelig å spå inn i fremtiden, men bedre batterier med høyere energitetthet kommer til å løfte hele transportbransjen, både på bakken og i luften når den slår gjennom.

3.11 Sammenstilling – potensiale for elfly i Norge

Den største utfordringen for alle elfly, uavhengig av hvis de bruker batterier, hydrogen, ammoniakk eller annen alternativ energilagring og elektrisk fremdriftssystem, er å få med seg nok energi om bord i flyet til å gi tilstrekkelig rekkevidde. Utfordringen for batterier er det lave energiinnholdet i forhold til vekt. For hydrogen er det å få ned volumet på en effektiv og sikker måte. I tillegg må det bygges ut mer fornybar kraft for å holde stabile og lave priser, og oppskalere produksjonen til de mengder som kreves i flyindustrien. Dette er også en utfordring for sertifisering siden kravene som gjelder i dag

¹² <https://www.forbes.com/sites/jamesmorris/2020/07/11/teslas-shift-to-cobalt-free-batteries-is-its-most-important-move-yet/>

¹³ <https://www.theguardian.com/business/2023/jul/04/toyota-claims-battery-breakthrough-electric-cars>

krever nok rekkevidde til å fly tilbake til opprinnelig flyplass ved to mislykkede landingsforsøk i hardt vær. I praksis betyr dette at rekkevidden må være minst det doble av flystrekningen.

I tillegg kommer de forventede utfordringene rundt å påvise like god, eller enda bedre sikkerhetsnivå enn dagens fossile fremdriftssystemer. Alle disse utfordringene er rent tekniske, og vil tilføre økonomiske utfordringer som er en direkte konsekvens av de begrensningene de tekniske utfordringene gir. Hvilken teknologi som kommer til å bli mest økonomisk bærekraftig gjenstår å se, det er sannsynlig at ulike flyruter kommer til å bruke forskjellig teknologi avhengig av behov og tilgang på strøm/hydrogen/SAF, rutelengde og passasjergrunnlag for å nevne noen. Dette kan bety at flyplassene må ha både ladeinfrastruktur og lagring av utslippsfrie flytende/gassformige drivstoff.

En stor prinsipiell forskjell er hvor mye fornybar energi som kreves. Når batterier lades har hele produksjonskjeden en virkningsgrad på 70-80 prosent. For hydrogen er det samme tallet 23 prosent. Dette betyr at tre ganger så mye energi kreves for hydrogenalternativet. En slik økning i behov kan være et problem i en region som Midt-Norge som allerede har et kraftunderskudd og er avhengig av import fra både Nord-Norge og Sverige. Fordelen med hydrogenalternativet, er at store energimengder kan lagres over tid og også brukes for fleksibilitetsforbedring i strømmettet. Men man må også huske at for å få storskala produksjon av hydrogen til rimelige priser, kreves tilgang til mye og billig fornybar kraft, noe som allerede i dag er en mangelvare. Flyet må også konkurrere med andre grønne prosjekter innenfor industri og annen transport om den kraften som er tilgjengelig.

Norge har et unikt stort antall flyruter og passasjerer for å være et såpass lite land som en direkte følge av den norske geografien. Denne geografien gjør Norge til det best egnede landet for bred utrulling av utslippsfrie teknologier siden de forventes å ha betydelig kortere rekkevidde enn dagens fossile fly. Norge har et stort nok passasjergrunnlag, gode støtteordninger til mindre flyplasser i distriktene og mange flyplasser som er jevnt fordelt i landet.

En annen utfordring som også diskuteres i bransjen er tilgang til nok piloter. Flere flyutviklere satser på å sertifisere sine fly med bare én pilot, noe som i dag bare er godkjent i en del småfly som ikke går i rutetrafikk for å redusere driftskostnadene. Slik sertifisering anbefales ikke av pilotorganisasjonene ECA (European Cockpit Association) og Norsk Flygerforbund¹⁴.

¹⁴ <https://frifagbevegelse.no/nyheter/planlegger-passasjerfly-med-kun-en-pilot-i-cockpit-et-sjansespill-med-sikkerheten-6.158.1066159.837c338f5b>

4 Teknologien som flyr i 2023

4.1 Motorteknologier som driver fly

Det finnes mange forskjellige motortyper som driver fly, eller har potensialet for å drive fly. De beskrives her for at leseren skal forstå hvorfor forskjellige motortyper har sine fordeler og ulemper og for å forstå hva forskjellen blir med elektriske fremdriftssystem. De vanligste er:

1. **Stempelmotorer:** Stempelmotorer, også kjent som svingkolbemotorer, er forbrenningsmotorer som fungerer ved hjelp av prinsippet om svingkolber som går frem og tilbake. Disse motorene finnes vanligvis i mindre regionale og kommunale fly. Ikke i kommersiell drift i Norge.
2. **Turbopropmotorer:** Turbopropmotorer er turbomaskiner (gasturbiner) som driver en propell direkte eller via girboks. Turbopropmotorer finnes vanligvis i regionale fly, kommunale fly og noen militære fly. Propellfly kan ikke fly like fort som turbovifte eller rene jetmotorer. Det er denne motortypen som brukes i flyene på det regionale flynettverket i Midt-Norge. Motormodellen i de Dash-8 100 og Q200-flyene som brukes er varianter av Pratt & Whitney 100-familien.
3. **Turbojetmotorer:** Turbojetmotorer er jetmotorer som opererer på prinsippet om å suge inn luft, komprimere den, blande den med drivstoff, tenne blandingen og sende den ut med høy hastighet for å generere skyvekraft. Turbojetmotorer er ofte brukt i militære fly siden motortypen klarer å fly fortere enn lydens hastighet. Men virkningsgraden er lav og brukes derfor bare i militære fly og noen privat-jetfly, da ofte i kombinasjon med en vifte for å redusere drivstofforbruket. Jetfly har de absolutt høyeste støynivåene, noe man tydelig hører når militære fly passerer.
4. **Turboviftmotorer:** Turboviftmotorer er den vanligste type jetmotor som brukes i moderne kommersielle fly. De er mer drivstoffeffektive og stillere enn turbojetmotorer. Generelt øker virkningsgraden, og støyen går ned, med større vifte. Dette er hovedgrunnen til at motorene får større og større diameter når utviklingen går fremover. Det er to hovedtyper turboviftmotorer. Lav-bypass turbovifter har en mindre vifte foran, der mesteparten av luften passerer gjennom motorens kjerne (varmeseksjon). Dette er typisk eldre motorer eller motorer som brukes i små private jet-fly og lignende. Høy-bypass turbovifter har en større vifte foran. Grunnen til dette er at hoveddelen av trekk-kraften skapes av den store viften. Designet gir høy skyveeffektivitet og redusert støy, noe som gjør dem ideelle for kommersielle fly. Utviklingen har de seneste årene gått mot større og større vifter, et tiltak som reduserer både drivstofforbruk og støy og er mulig grunnet mer avanserte produksjonsmetoder og sterkere materialer i viftebladene. De mest moderne motorene har et forhold mellom mengden vifteluft og kjernemotorluftmengde på omtrent 10:1 (for eksempel Rolls Royce Trent XWB og CFM LEAP).
5. **Turbinmotorer (Turboshaftmotorer):** Turbinmotorer er en type gasturbin-motor brukt i helikoptre og noen spesialiserte fly. De er designet for å produsere roterende akslingskraft for å drive en rotor eller annet utstyr, i stedet for å gi direkte skyvekraft.
6. **Elektriske motorer (elektrisk fremdrift):** Elektriske motorer blir stadig mer relevante innen luftfart, spesielt for små til mellomstore fly. Elektriske fremdriftssystemer bruker elektriske motorer drevet av batterier eller andre strømkilder som hydrogen og brenselcelle for å drive propeller eller vifter. De tilbyr potensielle fordeler når det gjelder reduserte utslipp og støy,

men sammenlignet med turboviftemotorer leder de til lavere flyhastighet og rekkevidde. Det som skiller forskjellige elektriske fly er lagringsmetoden av energien, det som skal erstatte drivstoffet i et konvensjonelt forbrenningsfly. De to mest sannsynlige metodene er batterier og hydrogen som omvandles til strøm i brenselceller. Et batteri lagrer elektrisk energi mens brenselcellen er litt mer kompleks. Selve brenselcellen er et apparat som skaper elektrisk strøm fra hydrogen som sammen med oksygen omformes til vann. Et system med brenselcelle lagrer energien i en tank med hydrogen for å skape elektrisiteten som driver motoren eller motorene.

En stor utfordring for elektriske motorer sammenlignet med gassturbiner er at når det kreves mye effekt øker effekten omtrent lineært med størrelsen (og dermed vekten) for en elektrisk motor, men for en gassturbin øker effekten med diameteren opphøyd til tre. Dette betyr at en gassturbin med høy effekt blir relativt lettere og lettere i forhold til en elektrisk maskin. Det er også meget utfordrende med dagens teknologi å bygge en lett elektrisk motor over 2-3 MW. Effekten for gassturbinene som driver Airbus A320 og Boeing 737 er i størrelsesorden 20-30 MW, ti ganger så mye som de største elektriske prototypemotorene som har blitt bygget for luftfart til dagens dato.

4.2 Propell, vifte og jetmotor

Alle flymotorer skaper fremdrift ved at luft akselerer når luften passerer gjennom fremdriftssystemet, uavhengig av om det er propell, turbovifte eller jetmotor. Prinsippet om impuls er det fysiske fenomen som utnyttes, men på litt forskjellig måte. De grunnleggende prinsippene kan forklares fra impulslikningen:

$$F = \dot{m}(V_{ut} - V_{in})$$

Trekraften F , kan bli stor på to måter, enten akselereres en stor luftmengde, $\dot{m}$, eller så akselereres luftmengden i større grad, det vil si at hastighetsforandringen er stor mellom flyets hastighet og luftens hastighet bak propellen/viften, $(V_{ut} - V_{in})$. En propell har stort areal, men en lav hastighetsforskjell. Det vil si en stor massestrøm som passerer gjennom propellen, men med en liten hastighetsforskjell på luften som passerer gjennom propellen. En slik løsning er veldig effektivt og gir lave tap så lenge man ikke flyr for fort. Hvis man skal fly fortere blir tapene i en propell mye større da det skapes virvler og sjokkbølger ved spissen på propellbladene som beveger seg fortest. For å redusere disse tapene kan man kapsle inn propellen, og slik minimere de store tapene ved spissen av bladene. Det er akkurat det som er gjort i en turboviftemotor, som litt forenklet er en propell som er kapslet inn. Det er denne typen nesten alle litt større fly bruker i dag og er det de fleste av oss tenker på når man hører om flymotor. Hvis man ser på hvordan bladene er utformet ser man også tydelige forskjeller. For at en turbovifte skal klare å håndtere høyere hastigheter uten å resultere i store tap så må bladene se helt annerledes ut for å fungere aerodynamisk optimalt. En turboviftemotor har flere blader enn en propell. Litt forenklet trenger man flere blader for å oppnå større hastighetsøkning på den luften som passerer gjennom viften. Dette er grunnen til at relativt små fly kan ha to propellblader som er relativt lange i forhold til størrelsen på flyet og større fly ofte har flere blader. For med to blader er det bare mulig å øke hastigheten på luften som passerer gjennom propellen lite ($(V_{ut} - V_{in})$ er lav).



Figur 12: Propell (venstre) og turbovifte (høyre). Den åpenbare forskjellen er at en propell har færre blader og mangler innkapsling. De fungerer prinsipielt likt, men er designet forskjellig ved at de fungerer effektivt for ulike flyhastigheter og rotasjonshastighet.

For mindre fly som ikke flyr så fort, som private småfly og regionalfly med en kapasitet på mellom 20 – 70 passasjerer bruker ofte propell. Rett og slett fordi forutsetningene tilsier at en propell er det beste kompromisset utfra virkningsgrad/effektkrav (drivstofforbruk) og kostnad.

Fordelene med en propell er at de har lange blader som roterer over en stor overflate og akselererer en stor luftmengde relativt lite. Dette prinsippet er grunnen til at turboviftemotorer over tid har økt i størrelse, det er mer drivstoffeffektivt enn å ha en lavere massestrøm av luft som akselereres mer (som i en jetmotor som militære fly bruker). Prinsippet kan forklares på flere ulike måter, men krever grunnleggende kunnskaper i fluidmekanikk, som er grunnen til at det ikke dekkes videre i denne rapporten. Men forenklet forklart så gir en høyere akselerasjon av luften mere støy og tap, lavt drivstoff-forbruk og lave støynivåer er veldig viktig i sivil luftfart og har av denne grunnen drevet utviklingen mot større viftediameter.

Noe alle kunder har blitt vant til over tid er å fly fortere, noe som har blitt mulig grunnet utvikling i gassturbin og fremdriftsteknologi. Men for å minimere drivstofforbruk og for å maksimere rekkevidde for utslippsfrie fly kan en del av løsningen være å fly langsommere. Rett og slett fordi dette krever mindre energi da det gir lavere aerodynamiske tap, og fordi energimengden er hovedutfordringen for både batteri og hydrogenfly. Ekstra rekkevidde er også viktig fra et sikkerhetssynspunkt med tanke på reservekrav. Mulighet til å fly til en alternativ flyplass ved dårlig vær og for raskere innføring i markedet siden det er hovedutfordringen for alle alternative energibærere i dag. Mangel på rekkevidde er grunnen til at alternative operasjonsmønstre tas opp som en viktig del for at fly med elektriske motorer skal kunne bidra til reduserte utslipp i luftfarten.

4.3 Motorteknologi – gassturbin med forbrenning og utslipp til luft

På det norske kortbanenettet flyr i dag det relativt små Dash-8-flyet. Motorteknologien i dette flyet er en Pratt & Whitney PW100 -motor som er designet på 1980-tallet og er motoren til mange forskjellige fly i den samme størrelsen. Tabellen under viser noen nøkkeltall som skal sammenlignes med elektriske motorer i senere kapittel.

Tabell 7: Data for Dash-8 flyets motorer.

Nøkkeltall	Størrelse	Enhet
Effekt på aksling	1800	kW
Vekt	450	kg
Dimensjoner	84 x 66 x 210	cm
Trykkforhold	~15	-
Virkningsgrad	35-40	%
Effektetthet	4	kW/kg

Generelt sett finnes det flere typer av motorer som driver ulike fly. Generelt sett drives alle kommersielle fly, utenom de aller minste, av ulike gassturbin typer. Grunnen til at alle bruker gassturbiner er at de er lettere i forhold til effekten de kan produsere sammenlignet med for eksempel stempelmotorer. I det norske regionalsegmentet har historisk sett P&W-motorer dominert siden Dash-8 er flytypen som Widerøe bruker på de fleste rutene som er i kommersiell drift i dag. Her kan man også notere at effekten på motoren er i samme størrelsesorden som de største elektriske prototype-motorene som har blitt bygget. Effekt-tettheten er også i samme størrelsesorden noe som tydelig påviser at dette forventes å bli omtrent den maksimale størrelsen av flymotorer som har potensiale for å erstattes av elektriske motorer de nærmeste 10-15 årene. For at elektriske motorer skal kunne oppnå mye høyere energitetthet må ikke-moden teknologi som kryogenisk kjølte maskiner eller lignende til. Men det er ikke motorteknologi som hovedsakelig holder tilbake en utrulling av elektriske fly, det er energilagringen og hvordan den kan bli stor nok med lav vekt.

4.4 Konvensjonelt drivstoff – Jet A-1

Jet A1 er det vanligste drivstoffet i Europa. Det er et kompromiss mellom høyt tennepunkt og lavt frysepunkt. Høyt tennepunkt er viktig fra sikkerhetssynspunkt sånn at det ikke tenner spontant før det skal og det lave frysepunktet er viktig for å sikre god drivstoffeksjon i kaldt klima. Drivstoffet må kunne håndteres sikkert på flyplasser opp til varme temperaturer uten risiko for å ta fyr. Det må også kunne pumpes og flyte i både oppbevaringsanlegg, for fylling og i flyet ved veldig kalde temperaturer. Dette krever at drivstoffet ikke forandrer sine egenskaper for mye mellom typisk 50 °C til -50 °C.

Prisen for konvensjonell, fossil Jet A-1 er i juni 2024 på Værnes 11,65 NOK/liter¹⁵, som alle andre drivstoff kommer dette å variere med markedet over tid. Utover grunnprisen for selve drivstoffet tilkommer diverse gebyr, disse kan variere noe fra flyplass til flyplass:

- CO₂-gebyr for fly som dekkes av EUs utslippshandel, 1,72 NOK/liter
- CO₂-gebyr for fly som IKKE dekkes av EUs utslippshandel, 3,00 NOK/liter
- Gebyr til lufthavnen på 0,055 NOK/liter
- Engangsgebyr for fylling på 465 NOK/fylling

¹⁵ Aviation Fuelling Services Norway sin prisliste for juni 2024, Hentet 27 juni 2024 fra https://www.afsn.no/wp-content/uploads/2024/06/Price-List-2024-06-JP8_JETA1.pdf

- Obligatorisk SAF-tillegg på 0,0169 NOK/liter
- CSO tillegg på 0,046 NOK/liter
- Moms på 25 prosent som legges på alle kostnader oven
- Dette leder til en totalpris på 20,61 NOK/liter

Det kan også tilkomme andre avgifter hvis man tanker lite (under 1000 liter) eller ikke meldt fra tanking i god tid og lignende.

SAF er rent kjemisk veldig likt fossil Jet-A1, men siden det fremstilles på kunstig måte kommer det til å inneholde et økt antall homogene karbonkjeder. For forbrenningen og bruken i en motor er dette egentlig bare en fordel siden det kommer å brenne renere og med mindre uønskede forbrenningsprodukter som sot og andre partikler. Men mangelen på en karbonkjede som kalles aromater bidrar til at motorprodusenter ikke sertifiserer sine motorer for 100 prosent SAF. Aromatene finnes i fossilt drivstoff naturlig og er ikke lange karbonkjeder på samme måte som hoveddelen av drivstoffet, det ser ut som ringer og har sterkere bindinger siden det er formet som en ring og ikke en lang kjede. Dette gjør at de brenner mer «ureint» men også smører tetninger i drivstoffsystemet, noe som leder til at tetninger laget av gummisveller og tetter optimalt. For å sikre at alle tetninger tetter sånn som de skal med høy andel SAF kan det kreves tilsatser av aromater eller andre komponenter i drivstoffet som har samme funksjon for å garantere at det ikke blir drivstofflekkasje noen plasser i drivstoffsystemet.

4.5 Egenskaper og krav for flydrivstoff og sammenligning med SAF

Jet A1 i forskjellige varianter er flydrivstoffet som brukes verden over. Jet A1 er et kompromiss mellom mange forskjellige egenskaper:

1. Energitetthet: Jet A1 har et energiinnhold på 43,1 MJ/kg. Samme nivå som diesel og andre lignende drivstoff. Dette gir høy effekt og god rekkevidde i flyene. SAF, som en enda mer homogent enn fossilt Jet A1, har ofte noe høyere energiverdi.
2. Høyt flammepunkt: Jet A1 har et relativt høyt flammepunkt, dette betyr at det er lav sannsynlighet for at det antennes på andre plasser eller måter enn i motorens brennkammer. Dette er et krav for å kunne håndtere og lagre drivstoffet på en sikker måte på flyplassene.
3. Fullstendig forbrenning: Jet A1 resultere i moderne motorer i god forbrenning uten å skape andre miljøfarlige stoffer enn drivhusgassene som skjer ved forbrenning av fossile drivstoff.
4. Jevn kvalitet: Jet A1 er et regulert og standardisert drivstoff med konsistente egenskaper verden over. Dette gir pålitelig egenskaper og jevn prestering i ulike fly for forskjellige operatører. SAF har egentlig enda jevnere kvalitet enn fossilt Jet A1 siden prosessen for fremstilling og raffinering kan kontrolleres nøye. Noen små forskjeller avhengig av hvor råoljen kommer fra kan gi små forskjeller i fossilt Jet A1, men de påvirker ikke funksjonen i motoren så lenge de oppfyller sertifiseringskravene.
5. Global tilgang: Jet A1 er tilgjengelig på alle flyplasser verden over. Tilgangen på SAF er mye lavere og ikke like godt spredt globalt.
6. Sikkerhet: Jet A1 er over veldig lang tid testet under strikte standarder som sikrer sikker håndtering og bruk.
7. Kostnadseffektivt drivstoff: Siden det er brukt i hele verden gir storskala produksjon et kostnadseffektivt drivstoff. Her ligger SAF langt etter siden det krever mye energi og nye investeringer i produksjon for å kunne nå samme storskala-fordeler som fossilt drivstoff.

Drivstoff må på samme måte som fly sertifiseres, dette er grunnleggende for å sikre en jevn og tilforlatelig kvalitet på drivstoffet. Slik sikrer man god forbrenning i motoren med mål om å oppnå de høyt stilte sikkerhetskravene i motorene og stabil forbrenning. For å minimere utslipp via så fullstendig forbrenning som mulig så er motorene finjustert til drivstoffet. Finjusteringen fører til at drivstoff som er litt forskjellig, som for eksempel syntetiske drivstoff (de inneholder normalt sett ingen/mye lavere nivåer av aromater) påvirker motorene slik at de må testes og sertifiseres på nytt for andre drivstoff, som for eksempel SAF.

4.6 Forventet påvirkning på billettpriser med SAF som utbytte for Jet A1

Mange forskningsartikler har sett på kostnad for alternativ til fossile drivstoff, hva som må til for at de skal kunne produseres og hvilket nivå prisen forventes å bli. Et eksempel er tatt fra Chalmers, og resultatene presenteres kortfattet i denne rapporten. Artikkelen ¹⁶ har sett på mange forskjellige produksjonsmåter og sammenlignet forventede kostnader for dem i to ulike produksjonsskalaer. En som bygger på liten skala (5 MW) med 2016 års teknologinivå og en som bygger på et større anlegg, tilsvarende 50 MW, med forventet teknologi i 2030.

Kostnadsnivåene varierer avhengig av produksjonsmåte og skala, det er antatt at størrelse er en kostnadsfordel og at teknologien utvikles sånn at kostnadene synker mot 2030.

¹⁶ Electrofuels: a review of pathways and production costs, Grahn, Brynolf, Taljegård, Hansson (2016)

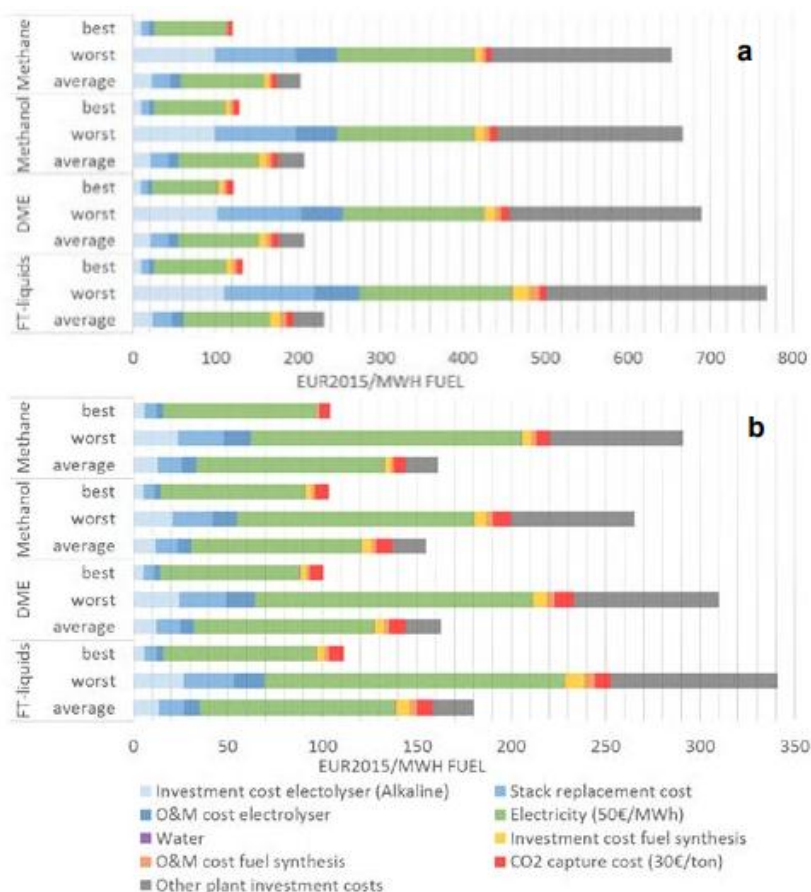


Fig. 1: Production costs of electrofuels based on (a) current technology in a 5 MW plant and (b) technology assumed available in 2030 in a 50 MW plant. Note the different scales on the x-axes.

Figur 13: Sammenfatning av forventede priser. Legg merke til at bilde (a) og (b) har forskjellige skalaer på x-aksen. Alle tall bruker en elektrisitetspris på 50€/MWh, en pris som tilsvarer omtrent 50 øre/kWh.

I alle prognoser er det store usikkerheter, for eksempel har vi sett store variasjoner i strømprisene de siste årene. Strømprisene fremover forventes å være høye og variabel med en fortsatt elektrifisering av alle deler av samfunnet og forholdsvis lav utbygging av ny kraft. Denne utviklingen kommer å påvirke alle former for kraftintensiv industri, særlig storskala produksjon av hydrogen som til stor del påvirkes av strømprisen.

Prognosene peker uansett i retning av at produksjonskostnadene for fornybare drivstoff kommer til å være på samme eller høyere nivåer enn dagens fossile drivstoff.

4.7 Støynivåer

Støy har mange forskjellige kilder fra et fly. Denne rapporten fokuserer på mindre propellfly siden det er disse som forventes å bli utslippsfrie først. Store turboviftmotorer som får reduserte utslipp via bærekraftige drivstoff, kommer til å produsere like mye støy som dagens alternativer siden motorene fungerer likt som de med fossile drivstoff.

- Forventet lavere støynivåer – mindre fly som flyr langsommere – lavere hastighet på all luft både rundt flyet og bak propellen/viften

- Hvor mye lavere? Hovedkilden til støy er luften som passerer propellen/viften som driver flyet fremover, hvis den er den samme med elektrisk motor blir støyen på det samme nivået som eksisterende forbrenningsfly.

Det er ikke enkelt å finne en god kilde på fordelingen av støy fra forskjellige kilder. Derfor er det vanskelig å svare på hvor mye mindre støy et fly med elektrisk fremdriftssystem vil gi, men det finnes i hvert fall ingen grunner til at støyen skulle bli høyere med elektrisk fremdrift. Mange støykilder vil naturligvis forsvinne som eksempelvis forbrenningsstøy og eksosstøy ettersom disse ikke er en del av et elektrisk fremdriftssystem. Men mange andre komponenter som propellstøy, støy fra landingshjul og aerodynamisk støy fra flykroppen vil fortsatt være det samme. Men den totale støyen vil forvente en reduksjon siden flere støykilder vil forsvinne. Moderne fly med lengre vinger kan lede til høyere støynivåer, fordi de vil kreve høyere hastighet ved start og landing, som leder til høyere aerodynamisk støy nær flyplassen. Men denne støyen er forventet å være minimal og ikke en direkte effekt av motorteknologien uten flydesignet. Disse effektiviseringene kan gjøres også for fly med konvensjonelle forbrenningsmotorer, det er derfor ikke en effekt av en forandring av fremdriftssystemet.

På militære flyplasser er det uten tvil de rene jet-flyene som F-35 som gir mest støy. Grunnen til økt støy kan forklares med Lighthill's formel^{17,18} som sier at mengden støy for turbulente luftstrømmer er proporsjonalt mot jet-hastigheten i åttende potens.

$$W = K \frac{\rho_0}{c_0^5} L^2 U^8$$

Lighthill's formel er eksperimentelt verifisert og gyldig for $Ma < 1$ (dette betyr at den ikke stemmer nøyaktig for militære fly som har en jet-hastighet $>> 1$ når de flyr langt over lydhastigheten). Kilden må være kompakt og forholdsvis liten i forhold til avstanden fra målingen av støynivået. Men den viser også tydelig at det kommer til å bli mest støy der lufthastigheten er høyest. Lufthastigheten er typisk høyest bak propell/vifte hvor det skapes trekkraft for flyet gjennom at luften som passerer akselereres.

I praksis betyr dette at man må få ned hastigheten på luftstrømmen som gir et fly sin drivende kraft fremover (impuls) for å redusere støy. Moderne sivile fly bruker dette som et tiltak for å oppnå bedre virkningsgrad i fremdriftssystemet. Akkurat dette prinsippet har ført til at utviklingen for alle sivile fly går mot større turboviftemotorer, større propell osv., fordi det gir både bedre virkningsgrad for fremdriftssystemet (som gir lavere drivstofforbruk og dermed lavere utslipp og bedre økonomisk drift av flyet) og mindre støy. Det grunnleggende prinsippet er at en vifte med større frontareal kan akselerere en større luftmasse mindre, noe som gir lavere tap og mindre støy, men med samme trekkraft.

Hovedkildene til støy for sivile fly er:

1. Støy fra fremdriftssystemet

- Propellstøy som oppstår når propellen akselerer luften rundt propellbladene når de rotere og interagerer med luften rundt dem. Hvor mye støy som oppstår er avhengig av antallet blader, den aerodynamiske formen på bladene og hvor fort de roterer.

¹⁷Lighthill, M. J. (1952, March). On sound generated aerodynamically I. General theory. In Proc. R. Soc. Lond. A (Vol. 211, No. 1107, pp. 564–587). The Royal Society.

¹⁸Lighthill, M. J. (1954, February). On sound generated aerodynamically. II. Turbulence as a source of sound. In Proc. R. Soc. Lond. A (Vol. 222, No. 1148, pp. 1–32).

- Eksosstøy som kommer fra den «jet» med eksosgasser som passerer gjennom motoren. Hvor mye støy som oppstår påvirkes av hastigheten på eksosgassene og utformingen av hvordan utløpet ser ut. Med elektriske motorer som ikke har noen forbrenning, oppstår ikke denne typen støy.
- Forbrenningsstøy oppstår i brennkammeret for både stempelmotorer og gassturbiner når drivstoffet blandes med luft og forbrennes. Elektriske motorer som ikke har noen forbrenning, har ikke denne typen av støy.

2. Aerodynamisk støy

- Flykroppsstøy oppstår når luft passer i høy hastighet over flykroppen, vingene og andre flykomponenter som skaper turbulente vaker. Utformingen av flykroppen, vingene og andre deler av flyet påvirker hvor mye støy som oppstår.
- Flap og landingshjulsstøy oppstår ved start og landing når piloten bruker de bevegelige delene av vingene for å påvirke løftekraften.

3. Annen støy fra fremdriftssystemet

- Kjølevifter og varmevekslere i kjølesystemet til motorene og andre systemer om bord på flyet som trenger kjøling skaper støy.
- Vibrasjoner fra fremdriftssystemet oppstår når deler roterer og forplanter seg i vingene og flykroppen.

4. Mekanisk støy

- Når kontrollflater på vingene, roder mm. beveges i svinger og ved start og landing kan mekanisk støy oppstå.
- Når landingsutstyret felles inn og ut oppstår støy når store komponenter beveger seg.

De dominerende støykomponentene er uten tvil de to første kategoriene, i hvert fall for mennesker og dyr i nærheten av en flyplass eller hvor fly passerer. Mekanisk støy oppleves ofte inne i flyet, men mye mindre på avstand. Alle moderne fly produserer så lite støy som mulig siden det henger veldig tett sammen med et godt utformet aerodynamisk fly som med så lite tap som mulig skal passere gjennom luften. Støynivåene kan også påvirkes via hvordan et fly nærmer seg landing, eksempel er høyde og utførelse av innflyging mot rullebanen.

5 Elektriske fremdriftssystemer fordeler og utfordringer

Elektriske fly har blitt et brennende tema i luftfartsindustrien og et symbol på den teknologiske revolusjonen som er nødvendig for å oppnå bærekraftig lufttransport. Elektrisk fremdrift representerer en lovende innovasjon som kan endre måten vi tenker om flyreiser, med potensial til å redusere betydelig i klimagassutslipp og støyforurensning. Samtidig møter denne banebrytende teknologien en rekke utfordringer, fra begrenset batterikapasitet til infrastrukturelle endringer. Denne rapporten tar sikte på de spennende mulighetene og komplekse utfordringene som omgir elektriske fly, og belyser de nyeste fremskrittene, forskningen og løsningene som er nødvendige for å bringe denne revolusjonen til nye høyder. Gjennom en grundig analyse og evaluering vil vi kartlegge veien fremover for elektriske fly og utforske hvordan de kan bidra til en mer bærekraftig og miljøvennlig fremtid for luftfarten.

I dette kapittelet kommer elektriske fremdriftssystem beskrives og lagringssystemer utforskes. Konsekvensene av ulike lagringssystemer for infrastrukturen på flyplassene kommer også til å beskrives med sikte på å danne et grunnlag for strategier for videre implementering.

Det finnes i dag hovedsakelig fire måter å lagre energien i fly med elektriske fremdriftssystemer:

1. Batterier
2. Hydrogen
3. Hybridsystemer
4. (Bærekraftige drivstoff (syntetisk fremstilte drivstoff, e-fuels/SAF), i konvensjonelle forbrenningsmotorer)

Produsentene som jobber med elektriske fremdriftssystem jobber med alle måtene, inkludert SAF. Det finnes i dag bare sertifiserte fly med batteri som energilagring i det elektriske segmentet, de flyene er små og er ment som skole og læringsfly og ikke for kommersiell passasjertransport. Flyvinger med bærekraftige drivstoff er gjennomført, dette er også den løsningen som flere store produsenter av fly og motorer peker på som eneste mulighet for reduksjon av utslipp. Grunnen til dette er nok at det ikke legger ansvaret for nye løsninger og risikable store utviklingsprosjekt over til hverken flyprodusentene eller motorprodusentene.

Hvilke løsninger som vil komme først, er avhengig av hva utviklerne klarer å produsere i tillegg til hva kravene fra bransjen er. Hovedmålet er å redusere utslipp fra flyindustrien. Batterier og brenselceller har et større potensial til å kutte utslipp, ettersom hybridsystemer og SAF fortsatt baserer seg på forbrenning som slipper ut klimagasser. Bruken av SAF kan likevel redusere de samlede systemutslippene, siden drivstoffet produseres med enten innsamlet karbon eller såkalt grønt karbon.

5.1 Elektriske fly – en introduksjon

For å begrense utslipp så mye som mulig må forbrenningsprosessen tas bort, karbonfangst er teknologisk mulig på bakken, men siden vekt er kritisk er dette ikke teknisk mulig i et fly. Elektriske motorer drives av strøm og innefatter ikke noen forbrenning. Indirekte utslipp som er avhengige av hvordan batterier og motorer produseres og hva som er kilden til strømmen som lader batteriene eller produserer hydrogenet må også tas hensyn til ved en livssyklusanalyse. Dette vil være en meget stor og kompleks oppgave og kommer ikke til å utføres i denne rapporten.

Norge har gode muligheter til å produsere strøm til lading og grønt hydrogen dersom mer fornybar kraft blir bygget ut sammen med et nytt og forsterket nett. Denne prosessen må forløpe i kombinasjon ettersom store mengder energi som i dag er fossil skal erstattes med kraft, enten direkte til batterilading eller til hydrogenproduksjon via elektrolyse.

5.2 Strøm og effektbehov for lading av elektriske batterifly

Det er for tidlig å si med sikkerhet at batterier blir den dominerende teknologien i fremtiden for elektriske fly. Det er dog en teknologi som flere bedrifter jobber med å utvikle, og hvis energitettheten i batteriene fortsetter å forbedres ser fremsikten svært lovende ut. Men uten en revolusjon i nærtid kommer kun småfly til å ha muligheten til å bruke batteri som energibærer, med en meget begrenset rekkevidde sammenlignet med konvensjonelle fremdriftssystem. Årsaken til dette er at store fly krever store energimengder at det ikke er mulig å ta om bord nok batterimasse for å drive store fly, eller småfly over store avstander.

For fly med batteri kan man enten hurtiglade batteriene når flyene står på bakken og venter mellom flyvinger, eller bytte batteriet etter en flyving mot et annet batteri som er fulladet. Fordelen med å ha flere batterier og et «bytte-system» er at ladingen av batteriene kan utføres langsommere, noe som gir lengre levetid for batteriet. Det gir også lavere belastning på strømnettet og mye lavere

effekttopper i kraftsystemet da batteriene kan lades når det øvrige samfunnet har lavt effektforbruk, eksempelvis på natten.

Men det finnes tekniske utfordringer med å bytte batteriene på flyplassen, som at det er utfordrende at få til en god kontakt som holder over tid og den infrastruktur som kreves for bytte av store og tunge batterier. Av denne grunnen forventes det at hurtiglading blir den dominerende teknologien. Hurtiglading stiller høyere krav til både lokal strømproduksjon og på effektkapasiteten i de lokale strømmettene på og rundt flyplassene.

Dagens batteriteknologi med energitetthet på 200-250 Wh/kg resulterer i forholdsvis tunge batterier og lav rekkevidde. Fly er veldig sensitive for vekt sammenlignet med biler og krever derfor høyere energitetthet for å oppnå rekkevidder som kan sammenlignes med lengden som dagens fly bruker på regionalflyvinger.

Et forventet effektbehov for lading kan beregnes fra et konkret eksempel, denne rapporten har tatt åpent tilgjengelige data for flymodellen Heart Aerospace ES-30¹⁹ (batteriversjonen), basert på følgende data og antakelser:

Variabel	Mengde	Enhet	Kommentar
Forbruk	0,035	l/(seat·km)	Estimat basert på 0,0312 l/(seat·km) for en Dash-8 Q400 ²⁰
N _{seats}	30	seter	
D _{km}	200	Km	Rekkevidde fra Heart Aerospace
LHV _{JetA-1}	34,884	MJ/l	Basert på densitet = 0,8075 kg/l ²¹
Ladetid	30	Min	Ladetid fra Heart Aerospace

Med følgende formel for energimengden (modifisert form av Breguet-ekvasjonen):

$$E = \frac{FC}{2} \cdot N_{seats} \cdot D_{km} \cdot LHV_{Jet A-1}$$

Dette gir i tall energimengden i batteriet:

$$E = \frac{FC}{2} \cdot N_{seats} \cdot D_{km} \cdot LHV_{Jet A-1} = \frac{0.035}{2} \cdot 30 \cdot 200 \cdot 34.884 \text{ MJ/l} = 3662.82 \text{ MJ} \rightarrow 3662.82 \text{ MJ} \cdot 0.27778 = 1017.5 \text{ kWh}$$

Med en ladetid på 30 minutter vil det kreve en lade-effekt på 2 MW per fly. Dette tallet kan senere bli brukt for å beregne ladeeffekten som kreves på en flyplass basert på hvor mange fly et elektrisk fly erstatter. I beregningen ovenfor er det antatt at et elektrisk fremdriftssystem har dobbelt så høy virkningsgrad som en forbrenningsmotor, herav er energimengden per sete delt med 2. For å forenkle beregningen er ikke tatt hensyn til krav på reservekapasitet i batteriet. Beregningen viser at 1017 kWh er nødvendig for å fly 200 km. Dersom det stilles krav om at flyet må kunne returnere i utgangspunktet, for eksempel ved dårlig vær som hindrer landing, må det legges til tilsvarende energikapasitet. Uansett kommer ikke ubrukt energi som er igjen i batteriet til reserve, ikke ha behov for å lades opp. Så det påvirker ikke ladetiden og ladeeffekten, men det påvirker den totale batterivekten.

¹⁹ <https://heartaerospace.com/es-30/>, 07/09/2023

²⁰ Bombardier Q400 NextGen fuel efficiency manual, <https://studylib.net/doc/18500975/q400-fuel-efficiency-manual---commercial-aircraft>

²¹ [Exxon mobile Jet A1 specification](#)

Hvis vi antar at det kreves en total batterikapasitet på 2000 kWh, medtatt reserve og andre ting som kreves for sertifisering, og en energitetthet på 200 Wh/kg betyr det at flyet må ha minimum 10 000 kg batteri. Denne vekten kan sammenlignes med den maksimale vekten modellen Dash-8 Q200 kan laste, inkludert drivstoffvekten, (40 pax) som er 6300 kg, eller en ATR 42 som har en maksimal nyttelast på 7300 kg. Det innebærer behov for nye fly som blir tyngre enn dagen fossildrevne, og dette er en stor utfordring for å kunne bruke batterier som energilagring.. Dette viser tydelig hvorfor de batterielektriske flyene som utvikles er veldig små, for når flyet blir større vil batterier ikke være realistisk uten en revolusjon i batteriteknologi.

Toyota holder likevel fast ved at de skal innføre faststoffbatterier i 2027-2028²² til biler med forventet dobbel rekkevidde sammenlignet med dagens biler med rekkevidde på omtrent 500-600 km.

Mengden batteri som kreves, selv for en veldig kort rekkevidde på 200 km helt uten reserver, er langt høyere enn det dagens fly klarer å fly med. Batteribehovet viser tydelig hvor mye bedre batterikapasitet som kreves for å få realistisk rekkevidde på fly i regionalstørrelsen. Et viktig poeng her er at det kreves ekstra energi som buffer for god sikkerhet, og dermed godkjent sertifisering. Dersom faststoffbatterier som forventes å oppnå omtrent dobbel energidensitet og hurtigere lading realiseres kan det lede til småfly med opptil 20 passasjerer. Men det må til nok en dobling før fly i størrelsen Dash-8 vil kunne erstatte flytende drivstoff kommersielt om man skal vedlikeholde dagens bruksmønster og flyhastigheter. Med totalt endrede driftsmønster kan en realisering komme noe tidligere. Men vil markedet akseptere å fly saktere og mellomlande oftere enn i dag? I Norge kan det fortsatt gi store tidsbesparinger og være mulig grunnet vår unike geografi med høye fjell og fjorder som strekker seg langt inn i landet. Men i Europa hvor motorveier og høyhastighetstog er konkurrenter vil nok markedet føle større begrensninger. Disse begrensningene har mye å si for markedspotensialet og vil sannsynlig forskyve store investeringer i banebrytende utviklingsprosjekt ettersom det potensielle markedet vil være begrenset.

5.3 Batteriteknologi – innledning

Batterier er en teknologi som allerede brukes i biler og det kommer stadig flere og flere bilmodeller som er fullelektriske og har batteri som energilagringssystem. For biler er batteriteknologi moden, selv om det finnes mye forbedringspotensial. Energitettheten oppgis å være opp mot 250 Wh/kg på pakkenivå. Pakkenivå betyr hele batterisystemet, når alle battericeller er satt sammen til et stort batteri, sammen med struktur som holder dem sammen, kjølesystem, styresystem og alt annet som kreves for å få batteriet å fungere som en enhet. Når ulike batterier og battericeller sammenlignes er det ofte vanskelig å sammenligne rettferdig siden mange oppgir energitettheten for cellen og ikke hele batteripakken, med eller uten kjølesystem og andre komponenter som kreves for at hele batteriet skal fungere. Derfor skal man være nøye når man sammenligner forskjellige batterier fra forskjellige produsenter, noe som er vanskelig ettersom dette ofte er hemmelig på pakkenivå, eller i hvert fall ikke tydelig presentert.

Energitettheten er helt avgjørende i flybransjen for å få nok rekkevidde, ha tilstrekkelig reserve for å oppnå sikkerhetskrav og for å klare å drive store nok fly langt nok til at det skal være økonomisk bærekraftig å bruke dem. Det vil kreve større energitetthet på batterier enn i dagens biler for at fly skal fly langt nok for å være lønnsomt.

²² <https://www.forbes.com/sites/peterlyon/2025/05/07/the-ev-holy-grail-a-battery-that-can-travel-745-miles-on-one-charge/>

- Elektrisk drevne fly krever batterier med en enda høyere energitetthet enn det som finnes i de mest moderne litumbatterier, ifølge Peter Omand Rasmussen²³.
- Ett batteri i de nyeste Tesla-modellene har en produksjonspris på rundt 100 000 kroner, ifølge Rasmussen. Hvis flybatterier hadde blitt produsert til samme pris per kg som Tesla-batterier, ville et flybatteri som veier 130 tonn (som ikke engang er nok til å kunne fly et større fly) koste rundt 26 millioner kroner.

Energitettheten i batterier varierer betydelig avhengig av batteritypen og teknologi. Batterier brukes i alt fra små elektroniske enheter til elektriske kjøretøy og fornybar energilagringssystemer. Her er en oversikt over energitettheten for noen vanlige batterityper som brukes i dag:

1. Litium-ion-batterier (Li-ion):
 - Litium-ion-batterier er svært vanlige i elektronikk og elektriske kjøretøy.
 - Energitettheten varierer, men typisk ligger den i området 150 - 250 Wh/kg for kommersielle Li-ion-batterier. Noen avanserte varianter kan oppnå høyere energitetthet.
2. Litium-polymer-batterier (LiPo):
 - Litium-polymer-batterier brukes ofte i droner, radio-styrte biler og små elektroniske enheter.
 - De har en energitetthet som ligner Li-ion-batterier, typisk i området 150 - 250 Wh/kg.
3. Nikkel-kadmium-batterier (NiCd):
 - Nikkel-kadmium-batterier var tidligere vanlige, men de brukes mindre i dag på grunn av miljøproblemer. Kadmium regnes som et giftig tungmetall som akkumuleres i kroppen i fisk, dyr og mennesker
 - Energitettheten for NiCd-batterier er vanligvis i området 50 - 80 Wh/kg.
4. Nikkel-metallhydrid-batterier (NiMH):
 - Nikkel-metallhydrid-batterier brukes i noen hybridbiler og mindre elektroniske enheter.
 - Energitettheten for NiMH-batterier er vanligvis i området 100 - 120 Wh/kg.
5. Bly-syre-batterier:
 - Bly-syre-batterier brukes i kjøretøy (for å drive startmotor og applikasjoner som ikke er relaterte til kjøring), nødstrømkilder og solcelleanlegg.
 - Energitettheten for bly-syre-batterier er relativt lav, vanligvis i området 30 - 40 Wh/kg.
6. Litium-jernfosfat-batterier (LiFePO₄):
 - Litium-jernfosfat-batterier er kjent for sin holdbarhet og sikkerhet og brukes ofte i elektriske busser og energilagringssystemer.
 - Energitettheten for LiFePO₄-batterier varierer, men typisk ligger den i området 100 - 160 Wh/kg.
7. Solid-state-batterier:
 - Solid-state-batterier er en lovende ny teknologi som forventes å ha høyere energitetthet enn konvensjonelle Li-ion-batterier for at det blir mer material som kan holde på elektronene.
 - For øyeblikket er kommersielle solid-state-batterier i utviklingsstadiet, men de har potensial til å oppnå energitettheter på 300 Wh/kg eller mer.
 - Toyota påstår at de har gjort gjennombrudd på denne typen batterier og sier at en rekkevidde for biler på 1200 km med en ladetid på 10 minutter eller mindre kommer å begynne produksjon i 2027²⁴. Dette peker i retning av en dobling av energitetthet, noe

²³ <https://flyhjelp.no/blog/el-fly>, intervju med Dr Peter Omand Rasmussen, Aalborg Universitet, Januar 2019

²⁴ <https://www.theguardian.com/business/2023/jul/04/toyota-claims-battery-breakthrough-electric-cars>, 04/10/2023

som hadde vært en utløsende faktor som skulle gi små elektriske fly en rekkevidde på 300-400 km.

Energitettheten er en viktig faktor når man vurderer batterier til ulike anvendelser. Høyere energitetthet gir lengre driftstid eller rekkevidde for en bestemt batterimasse, mens lavere energitetthet kan aksepteres når vekt og volum ikke er avgjørende faktorer. For fly, er vekten og energitettheten helt avgjørende for hvorvidt batterier skal kunne være energilagrende eller ikke. Utviklingen av batteriteknologi fortsetter, og forskere jobber stadig med å forbedre både energitetthet og andre batteriegenskaper.

De antakelsene som ligger bak de rekkeviddene som fly som Eviation Alice og Heart Aerospace ES-30 bygger på er med samme teknologi som brukes i biler i dag. Med disse antagelsene ligger energitettheten for hele batteriet, inkludert styringssystem og kjølesystem og lignende, antakeligvis i området på 200-250 Wh/kg. Dette betyr at batteriet vil veie mellom 4000-5000 kg. For å sette dette i perspektiv, så er det $\frac{1}{4}$ av maksimal take-off-vekt for en Dash 8 Q200. Det tilsvarer også hele vekten som flyet kan bære, 4647 kg²⁵. Disse beregningene påviser tydelig hva utfordringen med batteriteknologien er og hvor viktig energitettheten er for batterifly.

Konsekvensen av batterivekten påvirker hele flyets design siden hele flyet må designes for å klare å bære med seg batteriet, som ikke gir noen inntekter. For å muliggjøre lønnsom drift av flyet må man kunne bære så mange passasjerer og så mye last som mulig fordi det er nettopp dette flyoperatørene får betalt for.

5.4 Li-ion-teknologi

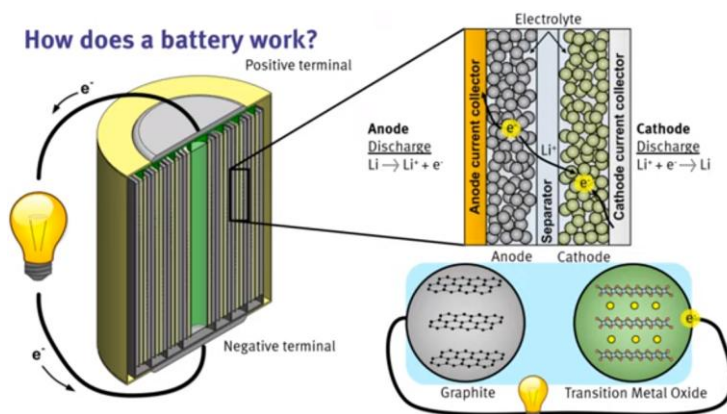
For å forstå både hvilke batterier som i dag er det som brukes, hvorfor de ikke er energitette nok for fly og hva mulighetene er fremover, gir dette kapittelet en introduksjon til hvordan Li-ion batterier fungerer, hva som gjør at de fungerer i biler og ikke i fly og hvordan de kan forbedres.

Vi begynner fra starten ved å drøfte hvorfor mee aller mindre alle batterier bruker Litium, kan andre metaller brukes isteden? For å svare på dette trenger vi å vite hvordan et batteri fungerer. Dette er forklart i det følgende kapittelet.

5.4.1 Hvordan fungerer et batteri?

Den grunnleggende funksjonen i et batteri er å lagre elektrisk energi, denne energien kan da brukes for å drive en last i en elektrisk krets.

²⁵ <https://www.baesystems.com/en/heritage/de-havilland-canada-dhc-8-dash-8>, 08/09/2023



Figur 14: En sylindrisk battericelle i gjennomskjæring.

Figur 15 viser en sylindrisk battericelle i gjennomskjæring, dette er den typiske formen for celler brukt i biler og i vanlige elektriske applikasjoner i hjemmet, som vanlige AA og AAA batterier. Det finnes også andre typer batterier som ikke er sylindriske. Det er også vanlig at de ligger i en pose og ikke har en hard overflate slik konvensjonelle batterier har. En sylindrisk battericelle består av mange lag av en «batterifilm» som rulles rundt en kjerne som kalles strømsamler. Batterifilmen vises forstørret i øvre høyre hjørne i Figur 15. Denne består av en anode og en katode. Anoden er laget av et porøst material, typisk grafitt, som inneholder et oksiderende metall som ved utlading av batterier skaper et Li-ion som gir fra seg et elektron som brukes i den elektriske kretsen batteriet er en del av. Elektronet forflytter seg gjennom anode strømsamleren til den positive enden av batteriet, gjennom lasten (det som batteriet skal drive, for eksempel en elektrisk motor, en lampe eller noe annet) og til den negative siden av batteriet²⁶. Li-ionet passerer gjennom separatorene og til katoden. Ved lading skjer det motsatte, Li-ionet passerer fra katoden, gjennom separatorene til anoden, det frie elektronet passerer via strømsamleren på katode siden til strømsamleren på anode siden og tilbake inn i anoden.

Katoden består også av et porøst materiale for å gi plass til Litium-ionene. På utsiden av katoden er det også en aluminium film som samler og transporterer elektronene når batteriet lades eller er i bruk. Her finnes det mange forskjellige materialer som brukes, disse er ofte forkortet for å beskrive kjemien i katoden. Vanlige katodetyper er:

Forkortelse	Betydning	Egenskaper
LCO	Lithium Cobalt Oxide	Dyre på grunn av kobolt innhold, høy elektrisk potensiale og energitetthet
LMO	Lithium Manganese Oxide	Billigere enn LCO, men lavere energitetthet enn LCO
LFP	Lithium Fosfate Oxide	Lavere kapasitet og spenning enn både LCO og LMO men mye billigere enn disse
NMC	Lithium Nickel manganese Cobalt Oxide	Lavere spenning enn LCO og LMO men billigere. Denne teknologien brukes akkurat nå mest i bilindustrien
NCA	Lithium Nickel Aluminium Oxide	

²⁶ Noter: Strømmen i et batteri flyter fra + til - per definisjon. Dette er en gammel definisjon som kommer fra opprinnelsen av elektrisk teori, før man kjente til at det er elektroner som forflytter seg. Elektronet ble oppdaget først på slutten av 1880-tallet. Siden elektronene er negativt ladet så strømmer de fra den negativt ladede siden til den positive i fysisk mening, fra - til +.

Separatoren er også porøs og separerer anoden fra katoden slik at de ikke er i kontakt med hverandre. Separatoren er porøs for å tillate Li-ioner å passere gjennom separatoren og flyte mellom anoden og katoden. Retningen bestemmes av hvis batteriet «brukes», det vil si driver en elektrisk krets som en lampe eller en motor, eller hvis det lades.

Elektrolytten er ofte en veske eller en gel som transporterer ionene mellom anode og katode. Elektrolytten i litium ion batterier er vanligvis litium salt som for eksempel litium hexafluorofosfat (LiPF₆) i en organisk løsning.

5.4.2 Anode og katodematerialer

Anoden, som er den negative siden i batteriet når et batteri er ladet, det vil si siden som kjemisk lagrer den elektriske energien, har i Li-ion batterier oppgaven å holde på Li-ionene. Katoden er den positive siden i et batteri, dit elektronene og ionene forflytter seg når batteriet brukes.

Grunnen til at Litium velges, er fordi det er den letteste av alkali metallene i det periodiske systemet, noe som gir en høy elektrodepotensial og høyeste teoretiske energitetthet²⁷. Litium har også fordelene av at det ikke krever vedlikehold og ikke degraderes ved bruk og lading. Ulempen med Litium er at det er veldig reaktivt og krever beskyttelse for å brukes sikkert. Av sikkerhetsårsaker kreves en sikkerhetskrets som begrenser maksimal spenning i batteriet og begrenser batteriet sånn at det ikke kan lades helt ut. Alle batterier opplever tapt kapasitet over tid, også Li-ion batterier, men det er ikke Li-ionene som slites. Kapasitetstapet oppstår av at andre materialer i batteriet endrer sine egenskaper over tid.

I dagens batterier som brukes i bilindustrien brukes grafitt i anoden. Grafitt er karbon i tynne krystalline lag som mellom hvert lag kan holde på Li. Grafitt er et ganske lett materiale, men det kreves 6 atomer i grafitten for å holde på en Li atom. Dette betyr at det kreves mye grafitt i forhold til mengden Li, noe som gir forholdsvis lav energitetthet i batteriet. Men dette er teknologi som har blitt brukt i ganske lang tid å ikke har samme produksjons- og bruksutfordringer som for eksempel silisium. Det forskes på å bytte ut grafitten i anoden mot silisium, grunnen til dette er at selv om silisium er dobbelt så tungt som grafitt, kan 1 silisiumatom holde på 4 Li atomer. Noe som forbedrer forholdet mellom mengden «hjelpemateriale» og litium i batteriet. Den store utfordringen med denne typen av anode er at den endrer størrelse veldig mye når batteriet lades og utlades. Størrelsesendringen leder til at silisumanoden sprekker og til slutt pulveriseres. Det finnes i dag ikke noen kommersielle batterier med silisium i anoden.

Et kompromiss mellom grafitt og silisium som også er på forskningsstadiet er rett og slett å blande mineralene for å få opp antallet Li atomer som anoden kan holde på, men med en utvidelse som kan kontrolleres uten å ødelegge anoden. Det gjenstår å se når disse anodematerialene kan bli tilgjengelige for kommersielle applikasjoner.

5.4.3 Termisk rusing – et sikkerhetsproblem med litium-ion-batterier

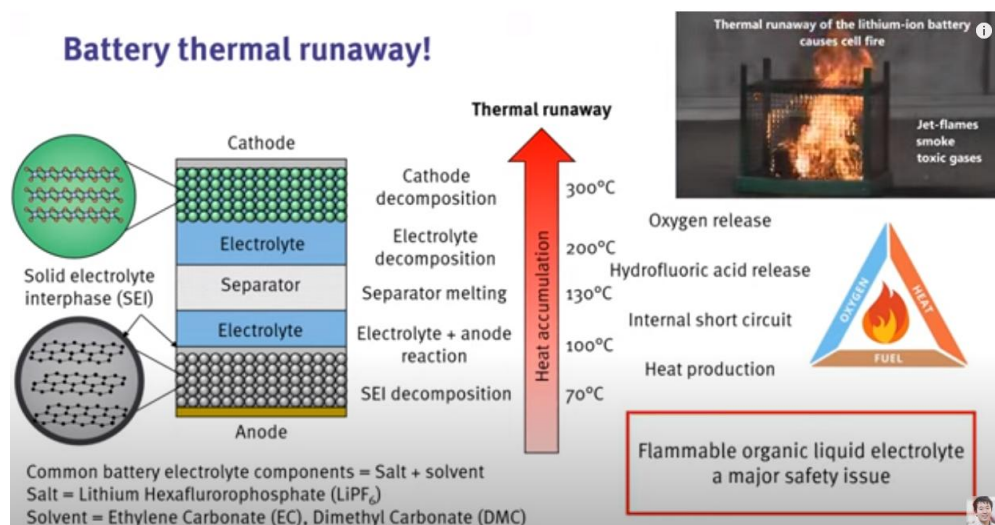
Det største sikkerhetsproblemet for Li-ion batterier er at de kan overhete og begynne å brenne. Overoppheting kan skje dersom battericellene skades eller blir utsatt for brann. Et litium ion batteri fungerer best i temperaturområdet 15 – 35 °C²⁸. For å holde kontroll på temperaturen i Li-ion batterier

²⁷ Earnshaw, Alan (1997). Chemistry of the Elements (2nd ed.). Butterworth-Heinemann. ISBN 978-0-08-037941-8.

²⁸ Review Of Comparative Battery Energy Storage Systems (Bess) For Energy Storage Applications In Tropical Environments, Agwu et al, 2018

kreves kjøling, i veldig kalde temperaturer kan oppvarming også kreves siden de kjemiske reaksjonene går tregere i kalde temperaturer og påvirker spenningsnivået i batteriet.

Nedbryting og varmeutvikling av et Li-ion-batteri begynner allerede på 70 °C med at SEI (Solid Electrolyte Interface) lagret som skal forhindre at anoden er i direkte kontakt mellom elektrolytten og anoden (grafitt) som brytes ned. Ved kontakt reagerer grafitten med elektrolytten sånn at mer varme produseres siden det er en eksoterm reaksjon. Ved 130 °C smelter den polymere separatoren som kortslutter anoden og katoden, dette fører til at strømmen flyter hurtig gjennom kortslutningen som skaper økt varmeutvikling. Ved 200 °C brytes elektrolytten ned, og ved 300 °C brytes katoden ned. Katoden er et oksid som ved nedbryting frigjør oxygen som da kan lede til brann. Elektrolytten, som er Li-salt (som for eksempel LiPF_6) er i seg selv brennbar. Å ha en brennbar komponent og et batteri som i tillegg kan utvikle eget oxygen er dessverre en av grunnene til at Li-ion batterier kan være veldig vanskelige å slukke.



Figur 15: Illustrasjon av hva som skjer ved termisk rusing (ukontrollert varmeutvikling) i et konvensjonelt Li-ion batteri.

Dersom den flytende elektrolytten kunne blitt byttet ut mot noe annet kunne risikoen for varmeutvikling og brann reduseres betydelig. En slik reduisering er også en god grunn for hvorfor faststoffbatterier vil være en stor forbedring for batterielektriske fly. Rent sikkerhetsmessig er en fast elektrolytt bedre siden den ikke brenner. Den er også lettere og tar mindre plass enn en flytende elektrolytt, noe som bidrar til høyere energitetthet.

5.4.4 Fordeler og ulemper med hurtiglading og batteribytte

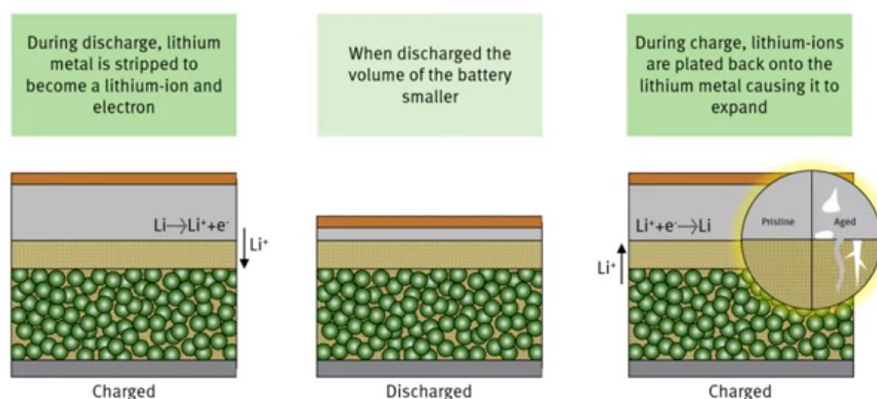
For å forstå konsekvensene av å velge mellom hurtiglading og batteribytte følger en enkel +/- analyse av teknologiene her under:

Hurtiglading		Batteribytte	
+	-	+	-
Bevaring av vekt og plass: Batteribytte krever ekstra plass for lagring av ekstra batterier og kan føre til økt vekt. Hurtiglading eliminerer behovet for ekstra batterier og	Lavere batterilevetid: Hurtiglading og dyp utlading sliter batteriet fortere en langsommere lading. Dette betyr at batteriene må byttes oftere siden de mister sin kapasitet over tid	Lengre batterilevetid: Langsommere lading (lavere effekt) sliter ikke ut batteriet like fort og batteriet klarer flere sykluser. Kort "ladetid:" Bytte av batterier tar vanligvis	Ekstra kostnader: Bytte av batterier krever flere sett med batterier, som kan være dyrt å kjøpe og vedlikeholde. Vekt optimalisering: For å øke kjøretøyets

dermed unødvendig vekt og plass.	ved dyp utlading og hurtig lading.	mindre tid enn å lade et batteri, da det bare innebærer å fjerne det tomme batteriet og erstatte det med et fulladet.	rekkevidde, kan det være nødvendig å installere flere batterier, noe som kan øke kjøretøyets vekt og redusere ytelsen.
Lavere total kostnader: Bytte av batterier krever investering i dyre ekstra batterier, mens hurtiglading bruker det samme batteriet gjentatte ganger, noe som potensielt kan føre til lavere totale kostnader over tid.	Lengre ladetid sammenlignet med bytte: Selv om det kalles "hurtiglading," tar det fortsatt lengre tid å lade et batteri sammenlignet med å bytte det ut med et fulladet batteri.		Miljøpåvirkning: Produksjon, lagring og transport av ekstra batterier kan medføre miljøpåvirkning, inkludert utslipp av klimagasser.

5.5 Faststoffbatterier – potensiale og forskningsstatus

Tidligere ble det nevnt diverse ulemper ved bruk av grafitt for å holde på Li atomene i anoden. Det optimale hadde vært å ikke ha noe materiale som holder på Li atomene i det hele tatt uten å ha rent litium i anoden. Da kan man også unngå en elektrolytt (som er brannfarlig og gir lavere energitetthet i batteriet), og slik unngå mye av problemene med Li-ion batterier eksempelvis termisk rusing. Hvordan det ser ut og fungerer ved lading og utlading er illustrert i Figur 17.



Figur 16: Faststoffbatteri ladet (venstre), utladet (midten) og aldret etter flere sykluser (høyre).

Hvis man sammenligner batteriet, som bygger på en grafittanode og elektrolytt, og faststoffbatteriet, ser vi at flere komponenter er borte og at hele batteriet er tynnere. Kan man få fast Litium (ikke løst i en elektrolytt) i anoden kan man ta bort den brennbare elektrolytten og få økt andel virksomt Litium i anoden som gir mye høyere energitetthet. Når et faststoffbatteri utlades ser vi at det faste Litiumet vandrer gjennom separatorene som ioner og gjør anoden mye tynnere. Akkurat som for Silisium i anoden, er det en stor utfordring at anoden endrer mye i størrelse. For batteriet må fortsatt sitte sammen å klare å håndtere disse syklusene av utlading og lading med store forandringer i tykkelse når Litium ionene vandrer mellom anode og katode. Vi ser også et annet problem som oppstår i separatorene. Problemet er at kjemiske reaksjoner leder til at dendritter vokser fra anoden i retning mot katoden i separatorene. Blir disse så lange at de når helt til katoden, blir batteriet kortsluttet og slutter å fungere. Dendritter er et problem som gir meget begrenset levetid og fører til at batteriet både taper i kapasitet og til slutt blir ubrukbart på grunn av kortslutning. Hvordan man skal klare å produsere faststoffbatterier i industriell skala uten disse problemene er en stor utfordring og hovedgrunnen til at faststoffbatteriene ikke allerede er rullet ut på de store batterimarkedene.

5.6 Brenselceller – teknologistatus og fremtiden

Utviklingen av brenselceller for transportsektoren går fremover, med hydrogenbrenselceller som en lovende løsning for å redusere utslipp både for land- og lufttransport. I 2024 ligger søkelyset på å forbedre virkningsgraden, infrastrukturen og gjennomførbarheten til hydrogenbrenselcellekjøretøy på tvers av ulike transportsektorer.

5.6.1 Nåværende status for hydrogenbrenselceller i transportsektoren

Hydrogenbrenselceller får økt oppmerksomhet for bruk i tungtransport som busser, lastebiler og tog. Disse anvendelsene drar nytte av hydrogenets energitetthet og raske påfyllingstid, noe som gjør dem egnet for langdistanse og hyppig bruk. Bilprodusenter og selskaper jobber med å forbedre infrastrukturen for hydrogentankstasjoner, spesielt i Europa, Japan og California, for å støtte en bredere bruk og flere bruksområder. Det finnes også eksempel på ferger i Norge som bruker hydrogen og brenselceller, som for eksempel MF Hydra, som opereres av Norled på strekningen Hjelmeland-Nesvik-Skipavik.

Til tross for entusiasmen, er det fortsatt utfordringer, som høye kostnader og behovet for omfattende tankinfrastruktur og hydrogenproduksjon. Fremskritt innen elektrolyseteknologi, som produserer hydrogen fra vann, bidrar til å redusere kostnader, mens pilotprosjekter for hydrogenstasjoner utvides globalt. Spesielt hydrogenbusser og langdistanse lastebiler testes og tas i bruk i små flåter i områder med sterkere støtte for hydrogeninfrastruktur^{29,30}.

Det finnes også få muligheter å fylle hydrogen for både næringslivet og privatpersoner i Norge. I Midt-Norge finnes bare et påfyllingssted og dette er eid av ASKO som hovedsakelig fyller sine egne lastebiler som bruker hydrogen.

Flere selskaper har gjennomført testflyginger delvis eller helt med hydrogenelektriske fremdriftssystemer. Disse testflyvningen har foregått under meget kort tid med meget begrenset mengde hydrogen. På samme måte som for batterier, som er for tunge med dagens nivå av energidensitet, er tankene som skal holde hydrogenet store og tunge. For fly med hydrogen i gassform tar tankene stor plass i flyet, noe som krever at man tar ut mange seter og dermed reduserer passasjerkapasiteten. For fly som tenker å bruke flytende hydrogen er utfordringen å få en lett, sterk og godt isolert tank til å passe i flyet. Selve lagringen og fyllingsprosessen er også en utfordring for at flytende hydrogen ikke skal fordampe sånn at tanken inneholder høy andel gass. Noe kommer alltid til å fordampe/leke ut ved fylling, men for at mest mulig mengde hydrogen skal ende opp i tanken er det viktig å minimere mengden som fordamper.

Hydrogenbrenselceller i luftfart

Luftfartsindustrien utforsker hydrogenbrenselceller for å redusere sitt betydelige karbonavtrykk og sikter mot karbonnøytralitet innen 2050. Hydrogen testes både for direkte bruk i brenselcellesystemer og som en basis for bærekraftig flydrivstoff (SAF). De siste årene har selskaper som ZeroAvia og Airbus gjort fremskritt med prototyper av hydrogenelektriske fly. Disse flyene bruker hydrogenbrenselceller til å generere elektrisitet for fremdrift, noe som fjerner direkte karbonutslipp under flyging^{31,32}.

²⁹ <https://www.weforum.org/agenda/2022/07/how-to-achieve-net-zero-in-aviation/>

³⁰ <https://modelon.com/blog/innovations-in-aircraft-hydrogen-storage-in-2024/>
<https://www.fchea.org/transitions/2024/2/21/hydrogen-developments-in-aviation>

³¹ <https://www.fchea.org/transitions/2024/2/21/hydrogen-developments-in-aviation>

³² <https://www.weforum.org/agenda/2022/07/how-to-achieve-net-zero-in-aviation/>

Bruk av hydrogenbrenselceller i luftfarten viser særlig potensial for kort- til mellomdistanseflygninger. Testflygninger med hydrogenfly, som de modifiserte modellene til ZeroAvia, har vist at de kan fly regionale ruter med begrenset rekkevidde. Men hydrogentankene tar mye større plass enn tanker for fossile drivstoff som ofte plasseres i vingene. Hydrogentanker er for store og tunge til å kunne plasseres i vingene og må dermed plasseres i flykroppen. Dette påvirker mulig lasterom og antallet seter ved passasjerflygninger negativt³³.

Utfordringer og fremtidsutsikter i luftfarten

Et hovedfokus for hydrogenbruk i luftfart er å forbedre lagringsløsninger, som tanker for flytende hydrogen, som gir høyere energitetthet enn gassformig hydrogen. Innovasjoner innen tankisolasjon og lette materialer utvikles for å redusere ekstra vekt fra disse lagringssystemene. I tillegg er det viktig å forbedre påfyllingsmetoder for å håndtere kryogent hydrogen effektivt for å gjøre hydrogenfly praktiske for kommersiell bruk³⁴.

Fremover forventes det at hydrogenbrenselcelleteknologi vil støtte dekarbonisering av regional luftfart innen 2040, spesielt for flyvninger opptil 1000 kilometer. For lengre flyvninger utforskes også hydrogenforbrenning i tillegg til SAF som mulige løsninger³⁵. Begge metodene tar sikte på å redusere luftfartssektorens karbonutslipp samt å støtte internasjonale klimamål.

Sikkerhet i luftfarten med hydrogen som drivstoff

Sikkerhet er alltid et sentralt tema for luftfarten og med et helt nytt drivstoff som hydrogen er dette ekstra viktig. Dette kommer til å stille store krav for å påvise minst like god sikkerhet som med fossile drivstoff og kreve mye testing og støttesystemer for å håndtere eventuelle problem som lekkasje eller brann. Dette kommer også å kreve at flyene designes for hydrogen og for optimal utnyttelse av hydrogen som drivstoff kommer dette å stille en del nye krav på flydesignen. Fossilt drivstoff oppbevares normalt sett i vingene for at tyngdepunktet for flyet ikke skal endres i takt med at drivstoffet brukes opp. Hvis en stor og tung hydrogentank skal være i flykroppen, for eksempel lengst bak i flyet kommer dette å endre flyets tyngdepunkt med mye vekt lengre bak og påvirke flyets tyngdepunkt når drivstoffet brukes opp. Dette er uavhengig av hvis drivstoffet skal brukes sammen med brenselceller i elektriske fremdriftssystem eller hvis hydrogenet skal brennes i gasturbiner.

Rolls Royce er for eksempel en bedrift som har testet gasturbinmotorer med hydrogen som drivstoff³⁶ og tror på dette fremfor hydrogenelektriske fremdriftssystem. Hydrogen er forbrenningsmessig annerledes en konvensjonelt Jet-A1. Hydrogenet brenner både fortere og varmere, noe som krever at forbrenningssystemet designes på nytt og tilpasses hydrogen for en stabil forbrenning med så lave utslipp som mulig.

Oppsummert, selv om hydrogenbrenselceller fortsatt står overfor tekniske og infrastrukturelle utfordringer, er deres potensiale for utslippsfri transport både på bakken og i luften en drivkraft for fortsatt investering og innovasjon i sektoren. Særlig EU har både omfattende støtteordninger og ambisiøse mål om hydrogenets rolle i et utslippsfritt energisystem.

³³ <https://modelon.com/blog/innovations-in-aircraft-hydrogen-storage-in-2024/>

³⁴ <https://www.fchea.org/transitions/2024/2/21/hydrogen-developments-in-aviation>

³⁵ <https://www.weforum.org/agenda/2022/07/how-to-achieve-net-zero-in-aviation/>

³⁶ <https://www.ainonline.com/news-article/2023-09-26/rolls-royce-achieves-max-takeoff-thrust-hydrogen-powered-pearl-engine>

5.7 Hybridsystemer

Hybridelektriske fremdriftssystemer i fly kombinerer elektrisk kraft med tradisjonell kraft fra forbrenningsmotorer for å drive flyet. Disse systemene utnytter elektrisitet for å øke virkningsgraden, redusere drivstofforbruket og redusere utslipp av drivhusgasser, men mye av energien kommer fortsatt å komme fra et flytende drivstoff som gir utslipp. Selv om e-fuels/SAF brukes kan utslippseffektene i høy høyde gi en betydelig klimapåvirkning. Siden 2020 har flere fly som opprinnelig var tiltenkt å bruke batterier som energilagring nå gått over til hybrid for å øke rekkevidden og dermed potensialet for å selge til et større marked grunnet uteblitt utvikling av batterienes energitetthet.

Her er en generell oversikt over komponentene i et hybridelektrisk system:

1. Elektriske motorer og generatorer: Hybridelektriske fly er utstyrt med elektriske motorer som skaper fremdrift og generatorer som er integrert i motorene. Disse kan være elektriske viftemotorer eller propellmotorer, avhengig av flyets design og bruksområde.
2. Batteripakker: Flyet har en batteripakke som lagrer elektrisk energi. Denne energien kan brukes til å drive elektriske motorer direkte eller til å lade batteriene under drift for senere bruk.
3. Tradisjonelle brenselmotorer: I tillegg til elektriske motorer, har hybridelektriske fly tradisjonelle brenselmotorer, som jetmotorer eller turbopropmotorer. Disse motorene genererer kraft ved å forbrenne flydrivstoff, som vanligvis er jetdrivstoff.
4. Integrert kontrollsystem: Et avansert kontrollsystem overvåker og styrer hvordan kraften genereres og fordeles mellom elektriske motorer og tradisjonelle motorer. Dette systemet optimaliserer ytelsen og drivstoffeffektiviteten under ulike flyforhold.

Hybridsystemene i et fly kan utformes på ulike måter, en forbrenningsmotor kan drive en generator som skaper strømmen til elektriske motorer som driver en propell eller en vifte for å drive flyet fremover. Denne løsningen kan integreres med batterier for å optimalisere bruken av forbrenningsmotoren. Man kan også lagre ekstra energi i batterier som skaper den ekstra strømmen som kreves ved take-off og dermed ha en mindre forbrenningsmotor som da også får en høyere gjennomsnittsvirkningsgrad. Fremdriftssystemet kan også være en kombinasjon av en del som er hel-elektrisk og en del som er helt forbrenningsdrevet. Det blir da opp til hver produsent hvordan dette kan optimaliseres for å redusere utslipp så mye som mulig sammenlignet med et helt forbrenningsdrevet system.

Redusert drivstofforbruk: Elektriske motorer kan bistå tradisjonelle motorer under takeoff, klatring og høyeffektfasen av en flyving. Løsningen bidrar til å redusere belastningen på de tradisjonelle motorene og forbedrer gjennomsnittsvirkningsgraden, noe som igjen reduserer drivstofforbruket.

Forbedret ytelse og støyreduksjon: Hybridelektriske systemer kan gi økt ytelse og akselerasjon, samtidig som de genererer mindre støy sammenlignet med bare tradisjonelle motorer.

Miljøfordeler: Ved å bruke elektrisk kraft kan hybridelektriske fly redusere klimagassutslipp og luftforurensning, noe som gjør dem mer miljøvennlige sammenlignet med konvensjonelle fly.

Det er viktig å merke seg at det er variasjoner i hvordan hybridelektriske systemer implementeres avhengig av flyets design og produsent. Hovedmålet er imidlertid alltid å oppnå bedre energieffektivitet, redusere miljøpåvirkningen og forbedre ytelsen i luften. Hybridelektriske fremdriftssystemer er en viktig del av fremtidens luftfart, da de gir en overgangsvei mot mer bærekraftige flyløsninger med nullutslipp.

5.8 Sammenligning mellom elektriske motorer og gassturbiner

For å forstå hvorfor gassturbiner dominerer dagens flymarked og hvorfor det er så vanskelig å elektrifisere store fly som flyr veldig langt, må vi gå inn på noen grunnleggende skaleringsprinsipper. Det er enkelt å forstå at et stort og tungt fly krever mer effekt enn et lite fly siden de er tyngre. En gassturbins effekt skalerer med rotorens diameter i kubikk. En enkel skaleringsregel er som følger:

$$P_{\text{Gassturbin}} \propto D^3$$

I teorien skalerer også en elektrisk motor med økt diameter, siden mengden magnetisk materiale, kobber og så videre øker med volumet. Den store forskjellen er hvordan vekten av motoren følger effektutviklingen. For gassturbinen øker vekten nesten lineært med størrelsen og effekten øker kubisk, for en elektrisk motor øker den med volumet på samme måte som effekten. Dette betyr at man kan lage gassturbiner som har veldig høy effekt til de store flyene, i størrelsesorden 50 MW som er veldig lette sammenlignet med en elektrisk motor. Det finnes enorme elektriske motorer som driver store militære skip i denne størrelsesorden, men de veier hundrevis av tonn. Et eksempel er en elektrisk motor på 36,5 MW som er utviklet av amerikanske Northrop Grumman for militære skip, denne veier omtrent 75 tonn. Dette kan da sammenlignes med en Trent XWB som driver Airbus A350 og utvikler langt over 50 MW effekt og veier 6-7 tonn, forskjellen mellom gassturbin og elektrisk motor for store effekter er da en faktor 10. Dette viser tydelig den ekstreme forskjellen i vekt for gassturbiner og elektriske motorer når effekten er høy. Det er ikke enkelt å konvertere trekkraft, enheten som oppgis for flymotorer til MW elektrisk eller akseffekt, og det ville ikke vært en helt rettferdig sammenligning siden den elektriske motoren sikkert kan utvikles for å være mye lettere, da vekt ikke er like viktig i et skip som i et fly. Men med mye større effekt og en faktor 100 i vektforskjell viser hvor mye effekt en stor gassturbin kan produsere sammenlignet med en elektrisk motor per kg.

6 Infrastruktur og forutsetninger på lufthavnene

6.1 Introduksjon

Det finnes flere spor som kan redusere utslipp i mer eller mindre grad avhengig av modenhetsgraden og hvor konkurransedyktig teknologien er på pris. Dette kan skje på flere måter.

Beregning av strømmengde for ulike scenarioer avhengig av hvor mange fly som skal lades og hvor mye konvensjonelle fly som erstattes:

Elektrifisering med batterier

1. Strøm til konkurransedyktig pris.
2. Tilstrekkelig kapasitet i strømnettet for hurtiglading med høy effekt.
3. Batteriteknologien er energitett nok for tilstrekkelig flyrekkevidde.
4. Infrastruktur på flyplassene for lading.

Elektrifisering med hydrogen

1. Stor produksjon av hydrogen som er tilgjengelig nære alle flyplasser.
2. Kraftig utbygging av fornybar kraft for å kunne produsere den mengden hydrogen som kreves.

3. Bedrifter som kan investere i hydrogenproduksjon i stor skala med lønnsomme forretningsmodeller.
4. Et utbygd distribusjonssystem for å transportere hydrogen fra produksjonsplass til lufthavner og andre fyllingsplasser.
5. Utarbeider sikkerhetsregler og prosedyrer for å håndtere hydrogen på flyplasser.

Det er mange hinder som står i veien for begge disse scenarioene, særlig når det gjelder utviklingen av flyene og i strømmettet for produksjon av strømmen/hydrogenet. Det må også bli lønnsomt å produsere hydrogen og det må dermed skapes et marked som ikke bare er for fly for å spre investeringer og markedsrisiko.

Energiinnholdet i en liter flydrivstoff er 11,99 kWh/kg eller 9,6 kWh/l³⁷. I 2024 ble det solgt 1038 millioner liter, avrundet 1 milliard liter flydrivstoff i Norge³⁸. Energimengden dette tilsvarer er 9,965 milliarder kWh, eller omtrent 10 TWh, dette kan sammenlignes med hele Norges årsproduksjon av strøm i 2024 som var på 157,2 TWh³⁹ og var en ny rekord.

For å lade batterier inkludert tap (antatt virkningsgrad på 80 prosent) kreves en strømproduksjon på 12,5 TWh for å erstatte energien. Men dette er ikke realistisk siden langt fra alle fly kan elektrifiseres med batteri som energilagring. For å sette hvor mye energi som kan være mer realistisk å gjennomføre er flere ulike enkle scenarier analysert for å påvise både effekt og energibehov i neste kapittel.

6.2 Strøm og effektbehov for batterifly- scenarioer

Batteridrevne fly har et betydelig effektbehov, spesielt under lading mellom flyvninger. Effektbehovet avhenger av flyets størrelse, batteriteknologi og ladekapasitet. Typiske effektbehov per flytype er:

- **Små regionale fly (9-19 seter):** 0,5 - 2 MW ved hurtiglading
- **Mellomstore kortdistansefly (30-50 seter):** 2 - 5 MW
- **Større regionale fly (50+ seter):** 5 - 10 MW

For eksempel, et 9-seters elektrisk fly med et batteri på 500 kWh vil kreve ca. 1 MW effekt for hurtiglading på 30 minutter.

Mengden strøm for ulike scenarioer

For å forstå det totale strømforbruket i ulike scenarioer, kan vi beregne behovet basert på antall fly og antall daglige avganger.

Scenario 1: Småflyruter med 9-seters batterifly

- 10 fly i drift
- 6 daglige avganger per fly
- Batterikapasitet: 500 kWh

³⁷ "Handbook of Products" (PDF). Air BP. pp. 11–13

³⁸ Statistikk fra SSB for hele 2024, <https://www.ssb.no/statbank/table/13585/tableViewLayout1/>

³⁹ <https://www.ssb.no/energi-og-industri/energi/statistikk/elektrisitet/artikler/rekordhoy-stromproduksjon-i-2024>

- Daglig strømforbruk per fly: 3 MWh
- Totalt daglig forbruk: 30 MWh
- Totalt årlig forbruk: 10,9 GWh

Scenario 2: Mellomstore kortdistanseruter med 30-seters batterifly

- 5 fly i drift
- 6 daglige avganger per fly
- Batterikapasitet: 1 000 kWh
- Daglig strømforbruk per fly: 6 MWh
- Totalt daglig forbruk: 30 MWh
- Totalt årlig forbruk: 10,9 GWh

Scenario 3: Regionale ruter med 50-seters batterifly

- 5 fly i drift
- 8 daglige avganger per fly
- Batterikapasitet: 2 000 kWh
- Daglig strømforbruk per fly: 16 MWh
- Totalt daglig forbruk: 80 MWh
- Totalt årlig forbruk: 29,2 GWh

For å dekke økt strømforbruk fra elektrisk luftfart må energikilden vurderes:

- Utbygging av fornybar energi: Norge har nesten bare fornybar kraftproduksjon med vann- og vindkraft, men utvidelse av kapasiteten kan være nødvendig.
- Import: I perioder med høy belastning kan det være behov for å importere strøm.
- Lokal energiproduksjon: Solceller på flyplassene kan bidra til en del av energibehovet, men solproduksjon vintertid i Norge er ofte veldig liten.
- Strømnett, strømmettet må oppgraderes for å håndtere store, kortvarige belastninger ved lading av fly.

Spesifikke utfordringer for strømmettet inkluderer:

- Økt kapasitet i regionalnettet for å sikre tilstrekkelig effekt ved flyplassene.
- Balansering av belastning for å unngå effekttopper.
- Etablering av energilagringsløsninger som batteribanker for å redusere belastningen på nettet.
- Ladeinfrastruktur

Flyplasser må tilpasses for effektiv lading av batterifly. Nødvendige tiltak inkluderer:

- Hurtigladere med effekt på 1-10 MW per ladepunkt.
- Dedikerte ladeområder med tilstrekkelig plass for fly.
- Integrasjon med smart grid-teknologi for optimal strømstyring for å minimere behovet av nettutbygging som er dyrt og tar lang tid.

Strøm- og effektbehovet vil variere betydelig mellom større knutepunkter som Trondheim lufthavn Værnes og mindre regionale flyplasser.

Flyplass	Antall daglige avganger	Estimert effektbehov [MW]	Estimert årlig strømforbruk [GWh]
Værnes	50	30-50	100-150
Regionale lufthavner	10	5-10	10-20

For Værnes kreves store oppgraderinger i strømmett og ladeinfrastruktur, mens regionale flyplasser vil ha lavere, men fortsatt betydelige, behov for investeringer i ladeløsninger.

Elektrifisering av luftfart vil gi et betydelig effekt- og energibehov. Investeringer i fornybar energi, utbygging av strømmettet og ladeinfrastruktur er nødvendige for å støtte en fremtid med batteridrevne fly i Norge. Den forventet største utfordringen er å få nok effekt, særlig på mindre flyplasser som ofte ligger på plasser hvor nettet ikke kan levere tilstrekkelig etterspurt effekt.

6.3 Strøm og effektbehov for hydrogenfly og SAF

Det finnes allerede i dag et relativt stort marked for kjøp og salg av hydrogen til ulike kjemiske prosesser. Men nesten alt hydrogen som selges har fossilt opphav og kommer fra dampreforming av naturgass (metan, CH₄). Det er dyrere å fremstille grønt hydrogen via elektrolyse enn fra fossile kilder. På grunn av kostnadsforskjellene dominerer salget av fossilt hydrogen.

Hydrogenmarkedet i Norge har i løpet av dette prosjektet gått fra stor interesse til en konsolidering, akkurat som mange elektriske flyprodusenter, med eksempel som Norsk Hydro⁴⁰ som lagt ned sin satsing på grønt hydrogen, NTE har lagt ned sin satsing på hydrogen, Equinor har stoppet prosjekt på Vestlandet⁴¹ og Statkraft har stoppet sin satsing i Mo i Rana⁴². Dette har også ledet til at elektrolyseprodusenten NEL har nedbemannet i Norge⁴³.

Til tross for at mange store prosjekt har blitt satt på vent eller blitt avsluttet må luftfarten finne løsninger for sine utslipp, mange av flyprodusentene peker på SAF. For å produsere SAF på grønn måte kreves det hydrogen og en ikke-fossil karbonkilde. Hvis Norge legger til rette for SAF-produksjon kan dette åpne opp for mer hydrogen igjen. Men det mangler en strategi for en nasjonal tilnærming og hvordan Norge skal kunne nå EUs oppsatte mål om SAF-innblanding i flydrivstoff. Akkurat dette er et av punktene denne rapporten anbefaler. Nærmere beskrivelser av muligheter for SAF i Trøndelag kan leses om i «Veikart for e-fuels⁴⁴», som er utarbeidet i forbindelse med dette prosjektet.

⁴⁰ <https://www.reuters.com/sustainability/norways-hydro-phase-out-battery-green-hydrogen-businesses-2024-11-27/>

⁴¹ <https://www.ba.no/equinors-storsatsing-pa-hydrogen-er-avlyst/s/5-8-2765115>

⁴² <https://www.nrk.no/nordland/stopper-planene-for-hydrogenfabrikk-1.17404706>

⁴³ <https://www.nrk.no/vestfoldogtelemark/hydrogenselskap-stopper-produksjon-og-nedbemanner-pa-heroya-i-porsgrunn-1.17204452>

⁴⁴ https://renergycluster.no/hubfs/veikart_for_efuels.pdf?hsLang=no

Hydrogen kan produseres ved elektrolyse av vann, en prosess som krever store mengder strøm, eller gjennom reformering av naturgass med karbonfangst for å være utslippsfritt. For grønn hydrogenproduksjon er det nødvendig med fornybar energi som vind- eller vannkraft for å fremstille hydrogenet. Grunnet det store energibehovet som kreves for produksjon, lagring og transport av hydrogen vil systemet få store tap fra den fornybare kraften til energien som ender opp i tanken i et fly. Dette betyr at mer energi enn det som hydrogenet i tanken på flyet må produseres for å dekke opp tapene i produksjonskjeden.

For å produsere 1 kg hydrogengass, kreves omtrent 50-55 kWh med fornybar strøm (avhengig av virkningsgraden for elektrolyseprosessen). For å komprimere og kjøle ned hydrogenet for lagring og transport kreves også store energimengder. Hvor mye ekstra energi som kreves for komprimering og transport er helt avhengig av hvilken type infrastruktur som er tilgjengelig/bygges og hvilke tekniske løsninger som flyene krever.

Hydrogenfly krever en infrastruktur for produksjon, lagring og distribusjon. Flyplasser må tilpasses med:

- Hydrogenproduksjonsanlegg eller leveranse gjennom rørledning eller tanktransport
- Kryogene lagringstanker for flytende hydrogen (-253°C, hvis flytende hydrogen skal brukes)
- Sikkerhetsløsninger for håndtering og fylling, systemer som minimerer og håndterer lekkasje hvis det skjer

Hydrogen har høyere energitetthet enn batterier per kg og er derfor en meget lovende teknologi for fly, men krever mye utstyr som også veier mye avhengig av trykk og lagringstemperatur.

Hydrogenfly har lengre rekkevidde og lavere vekt enn batterifly i teorien, men krever mer kompleks infrastruktur og mye større investeringer på hver flyplass. Noe som mange i bransjen nevner som en stor utfordring for hydrogenflyene er design av tanken som skal inneholde hydrogenet. Ved moderate trykk (350 bar) er hydrogendensiteten ganske lav, omtrent 0,233 kg/liter, men man får en relativt lettere, men krever en større tank for en bestemt hydrogenmengde. Ved 700 bar er densiteten høyere, omtrent 0,420 kg/liter, men krever en mye tyngre og sterkere tank for å tåle det økte trykket. For å få enda mer hydrogen i en tank er et annet alternativ å bruke flytende hydrogen, dette krever en temperatur på omtrent -253 °C og en meget godt isolert tank. Trykket er typisk fra 1-10 atmosfærer, så trykket er mye lavere enn for gassformig hydrogen, men hovedutfordringen er som nevnt temperaturen og ikke trykket. Ved fylling av flytende hydrogen må man også forsikres seg om at hydrogenet ikke koker for å få med seg nok flytende hydrogen i tanken.

Værnes vil ha høyere hydrogenbehov enn de regionale lufthavnene grunnet flere fly. Eksempel:

- Værnes: Daglig behov på 50 – 100 tonn hydrogen
- Regional lufthavn: 5 – 20 tonn hydrogen

Produksjon av grønt hydrogen krever store mengder strøm, for en produksjon på 100 tonn per dag = 5 GWh/dag (~1,8 TWh/år).

Trøndelag har allerede et strømunderskudd, så utbygging av kraftproduksjon eller import kan bli nødvendig for å støtte hydrogenbasert luftfart lokalt i Midt-Norge.

7 Forutsetninger for elektrifisering av luftfarten i Norge

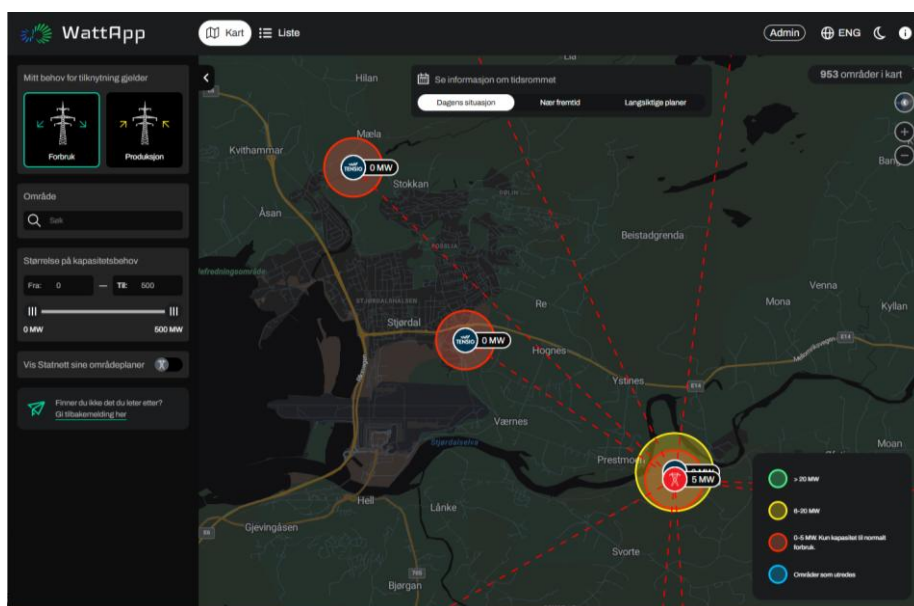
Ny teknologi må utvikles og tas i bruk for å klare å redusere utslippene fra luftfarten merkbart. Dette gjelder alt fra SAF, til hydrogen og batteri som energilagring. Både når det gjelder produksjon av drivstoff/lading på bakken inkludert logistikken som dette krever på flyplassene i tillegg til i flyene for å bruke de nye energilagringssystemene. Siden energien som skal brukes i flyene ikke kan ha fossilt opphav vil energien produseres i fornybar form. For å få dette til trengs det stor tilgang på fornybar kraft, og dermed må Norge øke utbyggingen av fornybar energi.

Den korteste og enkleste veien er SAF, men da flytter man den store utfordringen fra teknologien i flyene til at det kreves omfattende produksjon som fordeles over Norge for å minimere utfordringer med transport av drivstoffet. For å få til SAF produksjon kreves mye fornybar strøm og sterkere nett hvor produksjonsanleggene plasseres.

For hydrogen og batteri som energilager kreves det mer utvikling av teknologien i flyene, enten hydrogenet skal brennes i tradisjonelle motorer eller brukes i elektriske fremdriftssystemer. I tillegg må mer strøm på plass som lagres i enten batterier eller i form av hydrogen. Både batteri og hydrogen stiller store krav på investeringer i strømmettet, for hydrogen må også mange hydrogenproduksjonsplasser til for å få tilstrekkelig mengde til å tilsvare behovet for hele Norge.

7.1 Strømmettet – effektbegrensninger?

Strømmettet er i Norge allerede en stor utfordring med begrenset effekttilgang mange plasser, det er både begrensninger i lokal, regional og transmisjonsnettene avhengig av lokalitet. Dette er et problem som trenger å løses, både via mer kraftproduksjon og mer nett. Luftfarten er bare en del av transportsystemet som på alle områder trenger en omstilling for å redusere utslipp. I tillegg kommer utfordringene i transport på vei og på sjøen, hvor det er lignende utfordringer som luftfarten, men er noe enklere å få gjennomført rent teknisk siden begge sektorene er mindre vektavhengige enn luftfarten.



Figur 17: Oversikt over trafoene i Værnes-området som viser at lokale trafoene i Tensio sitt nett ikke har noe rom for nye tilkoblinger utenom vanlige husholdninger eller lignende.

Figur 18 viser hvor anstrengt strømmettet er i området rundt Værnes. Dette er en situasjon som er typisk i Midt-Norge og lengre nordover. Det er enten begrensninger i lokalt strømmett eller høyere opp i spenningsnivåene. For å kunne produsere kostnadseffektivt må større produksjonsanlegg til og disse krever mye effekt. Dette viser et typisk eksempel på at for å få til storskala hydrogenproduksjon (til enten SAF eller for direkte bruk i fly) kreves det forsterking av nett mange steder i Norge. Ofte gjelder dette på høyeste nivå, i Statnett sitt transmisjonsnett siden mange titalls MW må til for hydrogenproduksjon i større skala.

7.2 Energimengde – kan mer strøm produseres i Trøndelag?

Det enkle og teoretiske svaret er selvsagt ja. Eksisterende vannkraft kan oppgraderes for å produsere både mer energi, men mest av alt effekt. Det er teoretisk mulig å bygge ut flere små vassdrag og å sette opp flere vindmøller på land. Men tar man hensyn til allmenhetens protester mot ny kraft er det nok lite sannsynlig at det skjer noen større nye utbygginger de nærmeste 5 til 10 årene.

Men et stor potensialet ligger i energieffektivisering og å bruke andre kilder til energi enn strøm der det er mulig. Mye strøm, særlig vintertid, går til oppvarming i bygg, mer bruk av fjernvarme og ENØK tiltak som senker energimengden og effekten som kreves for oppvarming kan i kombinasjon brukes for å frigi strøm som da kan brukes hvor andre energiformer ikke er et alternativ.

Det er krevende å anslå hvor stort potensialet for ENØK-tiltak er målt i MW eller TWh. Erfaringene til RENERGY viser at mange bedrifter mangler lønnsomhet og incentiver til å investere i tiltak, spesielt når de allerede har den strømkapasiteten de trenger til egen drift. Det er i praksis hovedproblemet: de tekniske løsningene finnes, men motivasjonen for å frigjøre deler av den tildelte kapasiteten er svak.

For eksempel: hvorfor skal bedrift A investere i smart strømstyring, solcellepaneler eller batterier dersom gevinsten først og fremst er at bedrift B kan kobles på nettet? Samfunnsøkonomisk kan dette være svært lønnsomt, det kan skape arbeidsplasser, bidra til verdiskaping og styrke kommunen, men uten nye og målrettede incentiver blir det vanskelig å utløse slike investeringer.

Det er meget få prosjekt i strømområde NO3 som er lønnsomme som ENØK tiltak eller i alternative oppvarmingskilder eller lignende for å redusere strømforbruk. Mange bedrifter har ikke så store strømutgifter at de er interesserte i å investere i og drifte, for eksempel en smart driftssentral med solceller, batteri og «peak shaving» styring. For å si det veldig tydelig, strømpris og nettleie er ikke en stor nok utgift for de fleste bedrifter til at investeringer er interessant. Ifølge NVE kommer ikke strømprisene til å stige mot 2035 heller, for å lese mer om dette, se NVE sin rapport om forventet utvikling av strømprisene mot 2035⁴⁵.

Selv om slike investeringer kan senke både nettleie og strømforbruk blir tilbakebetalingstiden enten for lang eller så lang at i kombinasjon med å drifte et anlegg med lite tilknytning til kjernevirksomheten slik at risikoen oppleves som for stor for å utløse en investering. Selv om teknologien er godt moden og kan kjøpes av diverse forskjellige leverandører i dag.

⁴⁵ NVE rapport 25/2023 – Langsiktig kraftmarkedsanalyse 2023, side 60

7.3 Hydrogenproduksjon

Hydrogenproduksjon er en mulighet som har stort teknisk potensiale. Hydrogen kan brukes som generell energilagring, brukes i transportsektoren og ses av mange som løsningen for energilagring for elektriske fly i fremtiden. Vi har allerede i dag både lastebiler, biler og ferger som bruker hydrogen, utfordringen er at de er så få at markedet fortsatt er meget begrenset. Uten en sterk etterspørsel i et marked og med andre alternativer som er billigere (for eksempel fossile drivstoff som gir utslipp) er det en stor risiko å investere i produksjon i stor skala. Noe som foreløpig har ledet til lite utvikling av hydrogenproduksjon i Norge.

7.4 Lokasjoner for hydrogenproduksjon

Med liten utvikling av hydrogenproduksjon og anstrengt strømmnett med veldig lite plass til store nye tilkoblinger er det vanskelig å forutse hvor nye lokasjoner skulle kunne plasseres. Utfra ståstedet at man skal minimere transport vil det være logisk å legge produksjon nærmere brukere ved flyplasser, havner og godsterminaler der kundene kan forventes å være i fremtiden når hydrogen slår gjennom på bredere front. Men ofte er dette steder som også har anstrengt strømmnett, for eksempel Stjørdal og området rundt Værnes lufthavn. Inntrykket etter å ha fulgt hydrogenbransjens utvikling, eller hydrogenbransjens avventende holdning er at markedet venter på produksjon, og potensielle produsenter venter på markedsutvikling. For å få fart på både produksjon og markedsutvikling må nok langsiktige nasjonale planer på plass som dedikerer plass for nettilknytning hvor produksjon strategisk kan plasseres nærmere brukere. Siden dette krever samhandling mellom kraftproduksjon, nett, hydrogenproduksjon og markedsutvikling trengs noen form for politiske insentiver som tilrettelegger for utvikling av hele verdikjeden. EU har hydrogen som en viktig energilagringsmåte i sine strategiske planer, men de bygger på antakelser om stor tilgang på billig fornybar strøm som på vindfulle og solrikedager skal produsere stort energioverskudd som da lagres i hydrogenform.

8 Status for utslippsfrie fly og relevante initiativ

Som mange nye bransjer foregår det mye i en bransje i utvikling. Det har de seneste årene blitt en konsolidering og en demping av både forventninger og investeringer fra når prosjektet startet opp⁴⁶.

- De seneste årene har bransjen gjennomgått en konsolidering der flere oppstartsbedrifter har gått i konkurs.
- Bedrifter har sett etter at de advisert nye elektriske modeller at markedet ikke lenger ønsker å investere i nåværende modeller og heller venter med investering til de nye flyene er ferdigutviklet. Grunnet disse økonomiske utfordringene har noen prosjekter av bærekraftige fly blitt stoppet.
- Tiden som kreves for å sertifisere en helt ny flytype har også blitt undervurdert av flere selskaper. Oppgraderinger tar ofte de store og godt vante organisasjonene 5-9 år for full sertifisering, selv om det bare er oppgraderinger av allerede eksisterende fly. For helt nye flytyper med uprøvde fremdriftssystem tar det ofte lengre tid og koster mye penger i utvikling og testing.

⁴⁶ <https://www.aviationtoday.com/2023/06/12/electric-aviation-continues-to-progress-in-2023/>

- De store aktørene som Boeing, Airbus og Embraer har bevisst ventet for andre å utvikle småfly og har bare konsepter på tegnebrettet.
- For store fly har Boeing ikke uttalt noen tydelige mål og AIRBUS har forskyvet sine tidsplaner mot 2040 for helt nye flytyper som kan erstatte dagens fly.
- Batterier er mer og mer usannsynlig i annet enn for småfly, dette vises via at flere konsepter har gått fra ren batteridrift til hybrid (som for eksempel Heart Aerospace).
- Hydrogen ser ut å være eneste løsningen for lang nok rekkevidde, men design og vekt for tankene er en stor utfordring.
- GE, RR, Pratt & Whitney, SAFRAN og andre motorprodusenter har også i større grad begynt å se på alternative drivstoff, hydrogen og lignende samt videreutvikling av klassiske gassturbiner med forbrenning istedenfor helt utslippsfrie alternativer med elektriske fremdriftssystem.
- De seneste årene har nok dempet markedets forventninger for disruptiv teknologi og når den kommer å innføres bredt
- For større fly jobber egentlig bransjen videre på lignende måte som tidligere, forbedringer overalt, men inkrementelle som lettere vinger, nye materialer, større vifter og mer effektive motorer, men de skikkelige store forandringene vil nok ta veldig lang tid
- I mellomtiden er det kun bare småfly og SAF løsningen for å redusere utslippene fra flytrafikk.

9 Konklusjon

Luftfarten står overfor en omfattende omstilling dersom utslippene skal reduseres samtidig som dagens transporttilbud opprettholdes. Rapporten viser at det ikke finnes én teknologi som alene kan erstatte dagens fossile luftfart. Batterier, hydrogen og bærekraftig flydrivstoff (SAF) har ulike styrker og begrensninger, og fremtidens luftfart vil sannsynligvis bestå av en kombinasjon av disse løsningene.

Utviklingen de siste årene viser samtidig at innføringen av utslippsfrie fly vil ta lengre tid enn tidligere forventet. Batterifly fremstår først og fremst som aktuelle for små fly og korte ruter, mens hydrogen kan gi lengre rekkevidde, men krever omfattende utvikling av både fly og infrastruktur. For større fly vil SAF derfor være det mest realistiske alternativet for utslippsreduksjon på kort og mellomlang sikt.

Norge og Trøndelag har gode forutsetninger for tidlig innfasing av nye flyteknologier. Mange korte ruter, et godt utbygd nettverk av mindre flyplasser og FOT-ordningen gjør det mulig å teste og introdusere nye løsninger gradvis. Trøndelag er særlig interessant på grunn av korte avstander mellom flere av regionens lufthavner.

Den største utfordringen ligger imidlertid ikke bare i utviklingen av selve flyene. Batterifly, hydrogen og produksjon av SAF vil alle kreve betydelige mengder fornybar energi og nye investeringer i strømnnett og infrastruktur. Dette er spesielt utfordrende i Midt-Norge, hvor kapasiteten i strømnettet allerede er begrenset flere steder.

Skal Norge ta en tidlig posisjon innen grønn luftfart, må utviklingen av flyteknologi derfor ses i sammenheng med energisystem, infrastruktur, regelverk og kompetanse. Det bør etableres langsiktige nasjonale planer for hvilke ruter og flyplasser som skal prioriteres, samtidig som Trøndelag kan brukes som test- og kompetanseregion for nye løsninger.