



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2020 30 stp

Fakultet for miljøvitenskap og naturforvaltning

Tekno-økonomisk analyse av nødstrømsforsyning for mobile basestasjoner

Techno-economic analysis of emergency power
supply for mobile base stations

Eirik Meyer Solheim

Fornybar energi

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet våren 2020 og avslutter mine studier ved Norges miljø- og biovitenskaplige universitet.

Jeg vil takke veileder Professor Erik Trømborg for verdifull veiledning gjennom denne prosessen. Videre vil jeg takke mine kollegaer i Telenor, spesielt Ole Håvemoen og Lars Bundgaard for verdifull informasjon og hjelp ved å introdusere meg for fagpersoner som har delt sin kunnskap med meg.

Til slutt vil jeg takke familie og venner for motivasjon og støtte gjennom prosessen.

Sammendrag

Det er økt fokus på fornybar energi i teleindustrien og de norske teleoperatørene har forpliktet seg til å jobbe mot en 100% fornybar kraftforsyning. Nødstrømsforsyningen til norske mobilstasjoner består i dag av batteribanker eller nødstrømsaggregat. Som et ledd i moderniseringsprosessen undersøkes det om det finnes alternative fornybare nødstrømsforsyninger som kan konkurrere med og erstatte dagens løsninger.

Denne oppgaven undersøker hvilke alternative teknologier som er egnet for bruk i det norske mobilnett. Dette er gjort ved å identifisere kravene til nødkraft for mobilstasjoner som er satt av NKOM og teleoperatørene. Teknologier som kan være egnet er deretter målt opp mot kravene. Teknologiene som oppfyller alle kravene er undersøkt for å finne ytelsen til teknologien ved bruk til nødstrøm i mobilstasjoner. Det er bygget en økonomisk modell for å sammenligne kostnader. Resultatene fra den tekno-økonomiske analysen gir en helhetlig anbefaling av hvilken teknologi som bør benyttes i hvert av de undersøkte intervallene.

De strenge kravene til ytelse og økonomi resulterte i at det kun er batteribackup, nødstrømsaggregat og hydrogen-brenselceller som er egnet til bruk til nødstrømsforsyning i det norske mobilnett. Den økonomiske analysen er utført med to caser. Case 1 tar for seg investering nødstrømsanlegg for en ny mobilstasjon. I denne casen er brenselcelle den optimale løsningen 53,1% av intervallene, batteri 23,1%, aggregat 19,4% og ved 4,4% av tilfellene der det er to optimale løsninger. Case 2 tar for en investering i nytt nødstrømsanlegg for en eksisterende stasjon med batterirom. For denne casen er brenselceller optimalt i 1,9% av intervallene, batteri 83,7%, aggregat 13,1% og 1,3% av intervallene er det er to optimale løsninger.

resultatene viser at det vil lønne seg å investere i brenselceller for alle stasjoner som har et effektbehov på 5kW eller lavere i case 1. For case 2 er ikke brenselceller optimalt i mer enn 1,9% av intervallene.

Den helhetlige analysen konkluderer med at miljøhensyn ikke er store nok til å gå bort fra den optimale økonomiske løsningen. I tilfeller der det skal velges mellom nødstrømsaggregat og batteribank eller brenselcelle, bør aggregat velges bort på grunn av dårligere pålitelighet.

Abstract

There is increased focus on renewable energy in the telecommunications industry and the Norwegian telecom operators have committed to work towards a 100% renewable power supply. Today the emergency power supply for Norwegian mobile stations consists of battery banks or engine-generators. As part of the modernization process, it is examined whether there are alternative renewable emergency power supplies that can compete with and replace today's solutions.

This thesis investigates which alternative technologies are suitable for use in the Norwegian mobile network. This is done by identifying the requirements for emergency power supplies for base stations set by NKOM and the operators. Technologies that may be suitable are then measured against the requirements. Technologies that meet all the requirements have been examined to find the performance of the technologies when used for emergency power in base stations. An economic model has been built to compare costs. The results of the techno-economic analysis provide a comprehensive recommendation of which technology should be used in each of the examined intervals.

the stringent requirements for performance and economy resulted in that only batteries, engine-generators and hydrogen fuel cells are considered suitable for use in the Norwegian mobile network. The economic analysis is carried out with two cases. Case 1 deals with the investment in emergency power supply for a new base station. In this case Fuel cells is the optimal solution in 53,1% of the intervals, battery 23,1%, engine-generators 19,4% and in 4,4% of the intervals there is two optimal solutions. Case 2 looks at the investment in a new emergency power supply for an existing station with a battery room. For this case fuel cells are optimal in 1,9% of the intervals, battery 83,7% engine-generators 13,1% and for 1,3% of the intervals there are two optimal solutions. The results show that it will be profitable to invest in fuel cells for all stations that have a power requirement of 5kW or lower in case 1. In case 2 fuel cells are only optimal in 1,9% of the intervals.

the comprehensive analysis concludes that environmental considerations are not great enough to deviate from the optimal economic solution. In cases where the choice is between engine-generators and batteries or fuel cells, the engine-generator should not be chosen because of poor reliability.

Innhold

1. Innledning	1
1.1. Bakgrunn	1
1.2. Problemstilling	3
2. Basestasjoner og alternative nødstrømsløsninger	4
2.1.1. Introduksjon av basestasjoner	4
2.1.2. Alternative teknologier.....	5
2.1.3. Introduksjon av nødstrømsløsninger	7
3. Metode	14
3.1. Metodeoversikt.....	14
3.2. Litteraturgjennomgang.....	15
3.3. Krav og aktuelle løsninger.....	15
3.3.1. Krav	15
3.3.2. Basestasjonenes kraftforbruk	16
3.3.3. Stasjonenes forbruksprofil.....	17
3.3.4. Aktuelle løsninger.....	17
3.4. Økonomiske forutsetninger	18
3.4.1. Rentefot	18
3.4.2. Levetid	18
3.4.3. Kostnadsberegninger.....	18
3.4.4. Valg av utgangspunkt for beregningene	19
3.4.5. Excel-modell.....	20
3.4.6. Formler/begreper.....	21
3.5. Helhetlig analyse/anbefalinger	22
4. Resultater.....	23

4.1.	Vurdering av egnethet av vurderte teknologier	23
4.2.	Økonomisk analyse.....	26
4.2.1.	introduksjon	26
4.2.2.	Batteribackup.....	26
4.2.3.	Aggregat.....	33
4.2.4.	Brenselcelle.....	35
4.2.5.	Samlet Økonomisk vurdering.....	40
4.3.	Miljøeffekter	46
4.3.1.	Batterier	46
4.3.2.	Aggregat.....	46
4.3.3.	Fuel cell	47
4.4.	Samlet vurdering av løsningene.....	47
5.	Diskusjon og Konklusjon	49
5.1.	Hovedresultater	49
5.2.	Sammenligning av funn i annen forskning.	50
5.3.	Usikkerhet i forutsetninger.....	51
5.3.1.	Økonomiske forutsetninger.....	51
5.3.2.	Usikkerhet knyttet til teknologiene	51
5.4.	Videre forskning	52
6.	Kilder.....	53
6.1.	litteraturliste	53

Figurliste

Figur 2 - Eksempel på en -48V batteribank med tre strenger	8
Figur 3 - Oppsett av FC (Dantherm, u.å.)	12
Figur 1 – Teknøkonomisk metode	14
Figur 6 – kostnadsøkning for batterimoduler. Kostnad pr. år for batterier, 4 timer gangtid ..	27
Figur 7 - Totale kostnader for batteribackup inkludert bygningskostnader	28
Figur 8 - Totale kostnader for batteribackup inkludert bygningskostnader, 4 timer gangtid ..	29
Figur 9 - Totale kostnader/år pr. Watt	30
Figur 10 - Totale kostnader pr. år for batteribackup inkludert bygningskostnader, 72 timer gangtid	32
Figur 11 - Totale kostnader for 4 timer gangtid med og uten bygningskostnader	32
Figur 12 - Totalkostnad/Watt, Nødstrømsaggregat	35
Figur 13 - Totale kostnader i priser pr. år for FC	37
Figur 14 - Totalkostnader pr. Watt, FC	38
Figur 15 - Totale årlige kostnader for FC og batterier inkludert bygningskostnad, 8 timer gangtid	41
Figur 16 - Totale kostnader for alle teknologier, 36 timer gangtid	42
Figur 17 - Totale kostnader for alle teknologier, 72 timer gangtid	43
Figur 18 - totale kostnader pr år for FC og batteri case 2	45
Figur 19 - Totale kostnader pr år case 2, 72 timer gangtid	45

Tabelliste

Tabell 1 - Oppsummering av teknologiers egnethet.....	25
Tabell 2 – innkjøpskostnad for batteribackup, priser er innkjøpspriser pr. enhet	26
Tabell 3 - Opex for batterier, driftskostnader pr. år pr. enhet.	28
Tabell 4 - Antall batterier i den optimale løsningen inkl. totale kostnader for 4 timers gangtid	31
Tabell 5 – Investeringskostnad for Nødstrømsaggregat. Priser i kostnad pr. enhet	33
Tabell 6 - driftskostnad for nødstrømsaggregat. Priser pr enhet	34
Tabell 7 - Fordeling av kostnader for aggregat	34
Tabell 8 - Capex for FC. Priser pr. enhet	36
Tabell 9 - Opex for FC. Priser pr. enhet	36
Tabell 10 - Totalkostnader for FC, 500W, 1000W og 1500W	38
Tabell 11 - Antall gassflasker i optimal løsning for 72 timer gangtid.....	39
Tabell 12 - Oversikt over optimal teknologi i hvert intervall. AGG=Aggregat, BAT=batteri, FC=brenselcelle	40
Tabell 13 - Oversikt over optimal teknologi i hvert intervall for case 2. AGG=Aggregat, BAT=batteri, FC=brenselcelle.....	44
Tabell 14 - sammenligning av nøkkelparametere	48

1. Innledning

1.1. Bakgrunn

Det grønne skiftet er underveis også for teleoperatørene. Den internasjonale foreningen av teleoperatører, GSM Association, forpliktet seg i 2016 til FNs fornybare utviklingsmål, Sustainable Development Goals (GSMA, 2019). Dette innebærer at medlemmene av GSMA har et mål om sterkt reduserte utslipp innen 2030, og et ønske om 100% fornybar energi. Rapporten forteller videre at BT, Telefonica, T mobile og Vodafone har et mål om 100% fornybar energi innen 2030.

Ettersom Telenor, Telia og Ice er medlemmer av GSMA, er alle operatørene som har infrastruktur i Norge forpliktet til å arbeide for en 100% fornybar energiforsyning.

På grunn av Norges fornybare strømproduksjon på 98% (Energidepartementet, 2014) er de norske teleoperatørene allerede godt på vei. Når det gjelder nødstrømsforsyningen til stasjoner og der det ikke er mulig med nettilknytning, er situasjonen annerledes.

I Norge er det flere tusen basestasjoner som skal fungere 24 timer i døgnet, 365 dager i året. Stasjonene befinner seg på alt fra fjelltopper til bysentrum. Det er uunngåelig at det oppstår feil i strømmettet, men stasjonene skal forbli operative selv ved strømutfall. For at dette skal være mulig er det installert nødstrømssystemer på stasjonene som skal sørge for drift i timevis ved feil. Dette gjøres i dag med batterier eller dieselaggregat.

Operatørene har begynt å se etter nye løsninger for å adressere dette problemet. Telia skal bygge ut mobildekning langs Trollstigen der det ikke er mulig med tilknytning til strømmettet. Energiforsyningen skal baseres på 100% fornybar energi ved hjelp av solceller, vindturbiner og hydrogen (Telia, 2019), og Telenor kjører et pilotprosjekt som undersøker muligheten for nødstrømsforsyning drevet på hydrogen framfor diesel.

Mobilstasjoner er helt avhengig av en stabil strømforsyning. Tilnærmet alle mobilstasjoner er tilknyttet strømmettet og har dette som primær energikilde. Stabiliteten i nettet er derfor viktig å kjenne til for å kunne utforme nødstrømssystemer korrekt. Selv om forsyningssikkerheten er høy, er det sannsynlig at det vil oppstå brudd.

Bruddene sorteres inn i tre kategorier:

- Kortvarige brudd, mindre eller lik tre minutter
- Langvarige brudd, mer enn tre minutter
- Varslede avbrudd, alle brudd som er varslet av nettselskapet på forhånd.

NVEs avbruddstatistikk (NVE, 2019, s.42) viser kraftselskapene har langvarige avbrudd med gjennomsnittlig avbruddstid i intervallet 3-160 minutter, samt 0,5-7,5 langvarige utfall pr. sluttbruker i året. De kortvarige bruddene oppstår 0-8 ganger pr år med en gjennomsnittsvarighet på 20sek-3min. Dette viser at det er et behov for nødstrømssystemer dersom det ikke skal oppstå utfall på de mobile tjenestene ved feil i strømmettet.

Fra et økonomisk perspektiv vil det sannsynligvis kun være lønnsomt for teleoperatørene å installere reservestrømberedskap slik at kun relativt kortvarige strømbrudd vil kunne dekkes. For å sikre at de samfunnsmessige behovene blir ivaretatt har derfor Nasjonal Kommunikasjonsmyndighet, NKOM, satt en rekke krav til teleoperatørene.

Dette er gjort med hjemmel i ekomloven §2-10 som sier *«Tilbyder skal tilby elektronisk kommunikasjonsnett og -tjeneste med forsvarlig sikkerhet for brukerne i fred, krise og krig. Tilbyder skal opprettholde nødvendig beredskap, og viktige samfunnsaktører skal prioriteres ved behov.»* (Ekomloven, 2020)

For å tydeliggjøre hva «nødvendig beredskap» er, har NKOM (tidligere Post- og teletilsynet) laget rapporten «Minstekrav til reservestrømskapasitet i landmobile nett» (teletilsynet, 2014), som utdypet konkrete krav. Bakgrunnen for NKOMs rundskriv var det kraftige uværet Dagmar som førte til store utfall. For å sikre at nettet er robust nok til å håndtere tilsvarende hendelser i framtiden har NKOM satt minstekrav til reservestrøm:

- For tettsteder med mindre enn 20 000 innbyggere og i distriktsområder med fast bosetning eller næringsvirksomhet, skal reservestrømskapasitet være risikobasert, men minimum to timer. Samlet i området skal snittet være minimum fire timer.
- For tettsteder med mer enn 20 000 innbyggere, områder uten fast bosetning eller næringsvirksomhet, skal kapasiteten være på minst to timer.

Dette er minimumskravene og det er mange stasjoner som anses av operatørene som viktig nok til at stasjoner har mye lengre gangtid.

1.2. Problemstilling

I denne oppgaven analyseres de tekniske, miljømessige og økonomiske sidene ved å sammenligne eksisterende nødkraftforsyning med teknologier som i dag ikke er i bruk i Norge. Dette analyseres gjennom følgende delproblemstillinger:

1. Hvilke alternative løsninger for nødstrømsforsyning tilfredstiller krav gitt av myndigheter og operatører.
2. Hva er kostnader for de egnede løsningene?
3. Hvilken løsning anbefales ut fra en samlet vurdering av ytelse, kostnader og miljøeffekter?

2. Basestasjoner og alternative nødstrømsløsninger

2.1.1. Introduksjon av basestasjoner

For å forstå problemstillingen nødstrømssystemet skal løse, er det fordelaktig å forstå den grunnleggende oppbygningen av en basestasjon. Dette avsnittet vil derfor ta for seg hva en mobilstasjon er og hva en stasjon består av.

En basestasjon er første ledd i mobilnettet og sørger for kommunikasjon mellom kundenes mobiltelefoner og operatørens nett. Denne kommunikasjonen foregår trådløst over radiosignaler i frekvensbånd i området mellom 450 MHz og 3,6 GHz som gir 2G-, 3G-, 4G- og 5G-dekning. For å få god signalkvalitet plasseres stasjonene høyt i terrenget for at signalet ikke skal bli obstruert. Dette gir de beste forholdene for at stasjonen har et signal med lang rekkevidde og god kvalitet. I områder med lav befolkningstetthet er stasjonene ofte plassert på topper i landskapet. Dette gjør at adkomst til stasjonen er vanskelig og tidkrevende. Dette fører til at pålitelighet verdsettes høyt når en basestasjon skal designes.

En basestasjon består av følgende grunnleggende komponenter:

- **Antenner** for sending og mottak av signal. Dette er en sammensetning av 2G,3G, 4G og 5G etter hva stasjonen skal dekke. Antennene er festet i en mast eller et bygg for å få nødvendig avstand fra bakken.
- **Elektronikk.** Utstyr som produserer signal til antennene, Komponenter for prosessering av innkommende og utgående trafikk, samt komponenter for kommunikasjon med mobiloperatørens kjernenett. Disse komponentene sørger for at datatrafikken blir prosessert og sendt til riktig destinasjon.
- **Strømforsyning.** Den primære strømforsyningen består av krafttilførsel fra strømnettet. Dette er en kabel på lik linje med strømforsyningen til en husstand. Det leveres vekselstrøm ved 200V IT-nett eller 400V TN-nett etter hva nettselskapet i området tilbyr.

Komponentene i basestasjonen benytter seg av -48V likestrøm og må derfor ha en likeretter som konverterer vekselstrømmen fra nettet til nyttbar likestrøm.

I tillegg til den ordinære strømforsyningen har alle basestasjoner et nødstrømsanlegg som skal drifte stasjonen videre ved utfall i strømnettet.

- **Kjøle/varme-system.** System som sørger for at stasjonen ikke overopphetes om sommeren og ikke fryser om vinteren. På de aller fleste stasjonene er behov for kjøling mesteparten av året. Behovet for kjøleanlegg styres i stor grad av effektforbruket på stasjonen fordi utstyret utvikler mye varme. I tillegg er solinnstråling og omgivelsestemperatur avgjørende faktorer for størrelsen til kjøleanlegg.

kjøleløsningen kan være en lufteventil med eller uten mekanisk avtrekk der det er lite behov for kjøling, aircondition ved middels behov, eller kjølemaskiner der kjølebehovet er stort. Det kan godt være en kombinasjon av disse kjølemetodene der det er hensiktsmessig, siden det øker robustheten til kjøleanlegget. Om vinteren er det en del stasjoner som har behov for oppvarming i de kaldeste månedene. På stasjoner med lavt oppvarmingsbehov gir en panelovn tilstrekkelig med varme. På stasjoner med aircondition eller kjølemaskin er det naturlig at disse dekker oppvarming om vinteren.

2.1.2. Alternative teknologier

Ved undersøkelsen av hvilke teknologier som kan være aktuelle i bruk til nødstrømsforsyning av mobilstasjoner, er det undersøkt seks forskjellige teknologier. For å ha et sammenligningsgrunnlag med batterier og aggregat som i dag er bransjestandard, er disse inkludert i undersøkelsen.

Batterier

Batterier er den mest utbredte nødstrømsforsyningen for mobile basestasjoner (Popel' & Tarasenko, 2012, s. 866). Det er en veletablert teknologi som Teleselskapene har lang erfaringstid med. Årsaken til at batterier er mye brukt er den modulære oppbygningen som gjør at teknologien er fleksibel, slik at det er lett å tilpasse batteriløsningens ytelse til ulike mobilstasjoner. Batteriene kan levere en høy startstrøm øyeblikkelig, slik at det ikke er behov for en annen teknologi for å levere energi i øyeblikket strømutfall oppstår. (Drazga, 2012, s. 37) . En mer omfattende gjennomgang av teknologien finnes i Kapittel 2.1.3 - Batterier.

Aggregat

Nødstrømsaggregat er utbredt på stasjoner som har høy last. Dette kommer av at aggregat bør ha en kapasitet på minimum 10kW for å få tilfredsstillende driftssikkerhet (Nødkommunikasjon, 2012, s. 14). Fordi de minste aggregatene som er egnede har stor overkapasitet ved bruk i små mobilstasjoner, er det i hovedsak stasjoner med høy last der aggregat er egnet. En mer omfattende gjennomgang av teknologien finnes i Kapittel 2.1.3 - Aggregat

Kinetisk UPS

I denne teknologien lagres energien i et svinghjul. Løsningen vil operere i parallell med den ordinære strømforsyningen og tre i kraft når et utfall oppstår. For å kunne lagre energi i svinghjulet må løsningen ha en elektrisk motor som mates med energi fra nettet, som driver en aksling der et svinghjul er montert. På den andre siden av akslingen er det koblet på en elektrisk generator som konverterer den kinetiske energien tilbake til elektrisk energi. Så lenge nettspenningen er til stede vil motoren kun holde svinghjulet i gang uten at generatoren vil produsere. Ved strømbrudd vil generatoren skrus på og generere elektrisitet fra rotasjonsenergien som er lagret i svinghjulet. For å forlenge gangtiden er det mulig å koble et batteri på motoren slik at svinghjulet mottar energi etter utfallet. (Rashid Muhammad, 2011, kap. 24.2.6).

UPS basert på trykkluft

Denne teknologien baserer seg på at kompressorer lagrer trykkluft i et kammer slik at energien kan bli brukt på et senere tidspunkt. Når energien skal benyttes vil trykkluften drive en turbin med tilhørende generator for å produsere kraft. Denne type anlegg finnes kun i stor skala, og brukes til døgnbalansering i kraftnett (Drazga, 2012, s. 64). Det er behov for at kammeret som benyttes til trykklagring er stort. (Drazga, 2012, s. 64) oppgir at undergrunnsreservoar som salthuler, nedlagte gruver eller akvifer kan benyttes til lagringen av trykkluft. Dette betyr at det er behov for svært spesielle grunnforhold for at teknologien skal kunne benyttes.

Hydrogen-brenselceller (Popel' & Tarasenko, 2012)

Hydrogen-brenselceller baserer seg på at hydrogen lagres på gassflasker som benyttes til å produsere energi i en brenselcelle ved behov. Teknologien er i dag i bruk i transportindustrien (Ahluwalia & Wang, 2008, s. 167). Det har de siste årene kommet kommersielle nødstrømsløsninger på markedet som er basert på brenselceller. En mer omfattende gjennomgang av teknologien finnes i Kapittel 2.1.3 - Fuel cell

Superkondensatorbatteri (Drazga, 2012, kap "Ultracapacitors, s. 105)

Superkondensatorer er en elektrisk komponent som kan lagre elektrisk energi på samme måte som vanlige kondensatorer, men de har typisk evnen til å lagre mye høyere energimengder, typisk flere tusen ganger mer energi (Drazga, 2012, s. 105). en fordel ved superkondensatorbatteri er at de klarer flere ladesykluser enn normale batterier som fører til lenger levetid.

2.1.3. Introduksjon av nødstrømsløsninger

Batterier

Batterier er den vanligste formen for nødstrømsforsyning i det norske mobilnettet. Løsningen er utbredt på grunn av pris, enkel oppbygging, fleksibilitet og driftssikkerhet. Telenor har omtrent 6000 mobilstasjoner som benytter denne løsningen.

Batteribackup i Telenors nett.

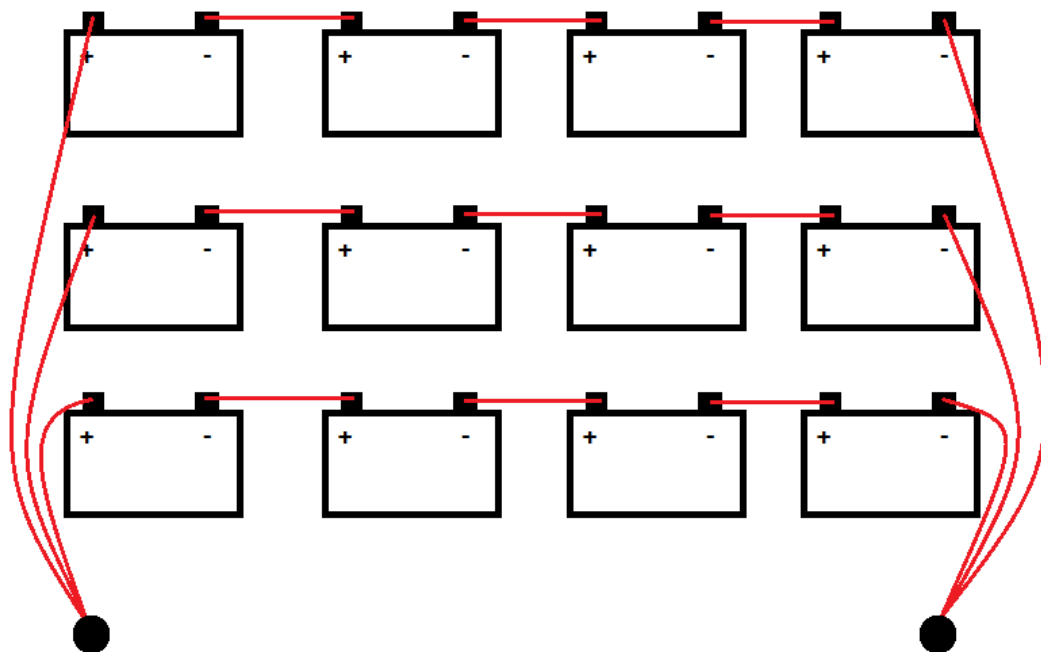
Dette avsnittet forklarer hvordan løsningen er implementert i Telenors nett. Dette er nyttig for leseren for å forstå oppbygging og virkemåte av løsningen som det regnes på i denne oppgaven.

Batteribanken består av strenger på fire seriekoblede 12V-batterier for å gi en utgangsspenning på -48V. For å øke kapasiteten utvides antallet strenger. Dette gjøres ved å parallell-koble strengene, Se **Feil! Fant ikke referanseilden.** som viser oppbyggingen en bank med tre strenger. Et alternativ til å øke antall strenger er å velge batterier med høyere kapasitet.

Batteriforsyningen har stor kapasitet til å levere effekt, slik at løsningen kun begrenses av antall amperetimer batteriene kan levere for bruk i mobilstasjoner.

Den modulære oppbyggingen gjør at løsningen er ekstremt fleksibel, slik at batteribackup er egnet til de aller fleste mobilstasjonene som finnes i nettet.

En stor fordel med batteribackup er at batteriene leverer energi momentant når det oppstår et nettutfall. Denne teknologien er derfor den eneste av de tre løsningene som ikke har behov for ekstra komponenter for å levere energi den første tiden etter strømutfall. Det er ikke behov for automasjon av anlegget ettersom likeretteren har integrert styring av batteriene. sammenkoblingen av batteriene og likeretter gjøres ved at det installeres likerettermoduler i likeretteren som styrer forbruk fra batteriene og lading.



Figur 1 - Eksempel på en -48V batteribank med tre strenger

Feil og feilretting

Løsningen er den mest utbredte i Telenors nett og erfaringsgrunnlaget er derfor stort.

Erfaringer fra drift gir at følgende feil oppstår oftest:

- Feil på batterier ved høy romtemperatur. Batteriene utvikler mye varme ved drift og er derfor utsatt for varmgang dersom ventilasjonen ikke er tilstrekkelig god.
- Sikringsbrudd etter tomme batterier pga. stor ladestrøm. Den store lasten ved å lade opp batterier dersom de lades helt ut, løser tidvis ut sikringer for likeretteren og gjør stasjonen strømløs
- Feil på likeretters styresystem kan føre til at stasjonen vil gå ned.
- Defekte enkeltbatterier. Dette vil føre til en reduksjon i gangtid, men stasjonen vil ikke gå ned.

Aggregat

På stasjoner der effektforbruket er stort eller det er høyt krav til gangtid, er det i dag oftest installert dieselaggregat. Det er omtrent 350 nødstrømsaggregat i Telenors nett.

Bruk i Telenors nett

Et nødstrømsaggregat er komplekst. Nødstrømsanlegget består av:

1. **Aggregatet**, som er en dieselmotor med generator og tavle for tilkobling av strømmuttak og styring. Aggregatet er vannkjølt og har radiator og kjølevifte integrert.
2. **Automasjon**. Elektronikk som sørger for oppstart ved utfall. Dette inkluderer sensorer som detekterer nettspenning, tanknivåer og aggregatets driftsstatus. Anlegget styres av en PLS (Programmerbar Logisk Styring) som sørger for at oppstarts- og nedstengings-prosessen skjer til riktig tid og i riktig rekkefølge
3. **Batteribank**. Aggregatet kan bruke opptil flere minutter på å starte, slik at det er installert en batteribank for drift i tidsrommet mellom utfallet oppstår og aggregatet er klar til drift. Denne banken er bygget på samme måte som batteribackup forklart i kapittel 2.1.3 – Batterier, bortsett fra at gangtiden er svært kort.
4. **Tanker til drivstoff**. Stasjoner med nødstrømsaggregat har en stor nedgravd tank der drivstoffet lagres. Disse har oftest kapasitet på over 1000l. Diesel pumpes opp til en liten dagtank som typisk er på noen titalls liter, som befinner seg i aggregatrommet. Hovedtanken leverer diesel til dagtanken som igjen leverer drivstoff til aggregatet.

Transport av drivstoff mellom bunkertank og dagtank blir gjort av en dieselpumpe som styres av PLS.

5. **Kjølesystem.** nødstrømsaggregat utvikler svært mye varme og rommet aggregatet står i har derfor behov for kjøling. Kjøleløsningen består av kjølevifter med motoriserte spjeld som sørger for at varm inneluft blir ventilert ut. Når aggregatet startes vil PLS starte ventilasjonsløsningen til aggregatrommet.

Nødstrømsaggregatet er på grunn av de mange komponentene, størrelsen til aggregatet og kjølebehovet den mest kompliserte og plasskrevende løsningen.

Størrelsen til drivstofftanken gjør at løsningen er godt egnet til stasjoner med krav til lang gangtid. Fordi tanken ofte er stor nok til flere dagers drift er mulig å frakte ytterligere drivstoff til stasjonen før den går tom for drivstoff, ved svært langvarige utfall. Dette betyr i praksis at stasjoner med nødstrømsaggregat kan driftes kontinuerlig så lenge det sørges for nok drivstoff.

Feil og feilretting

Den store kompleksiteten til løsningen gjør at den er mer utsatt for feil enn batteribankene. Feilene som oppstår på nødstrømsaggregat er ofte komplekse og tidkrevende å rette.

Vanlige feil for aggregat er:

- Feil på startbatterier. Fører til at aggregatet ikke starter ved nettutfall.
- Feil på batteribank. Fører til at stasjonen vil gå ned i det strømutfallet oppstår, men vil starte så fort aggregatet begynner å levere kraft.
- Feil på dieselpumpe. Aggregatet vil starte som normalt, men vil stanse etter få timer siden pumpen ikke bringer diesel mellom dagtanken og bunkertanken.
- Feil på styringsanlegg. Feilårsak kan være feil på reléer, sensorer eller PLS. Dette kan ha alt fra små konsekvenser til at aggregatet ikke vil starte.
- Feil på kjøling. Motoren i aggregatet vil bli for varm og vil stenge ned etter kort tid. Høy temperatur kan også føre til feil temperaturfølsomme komponenter som slanger og elektronikk tar skade.

Fuel Cell

Løsningen er ikke i utbredt drift i Norge, men teknologien er nå moden for implementering i det norske mobilnettet og både Telenor og Telia undersøker mulighetene for å benytte teknologien i sine nødstrømsforsyninger. Teknologien er aktuell for små til store stasjoner.

Bruk i Telenors nett

I Telenors nett er FC kun i drift som et pilotprosjekt for fire utvalgte stasjoner. Stasjonene ble idriftssatt mellom november 2018 og mars 2020. Det er derfor begrenset med erfaringsdata fra drift i Telenors nett.

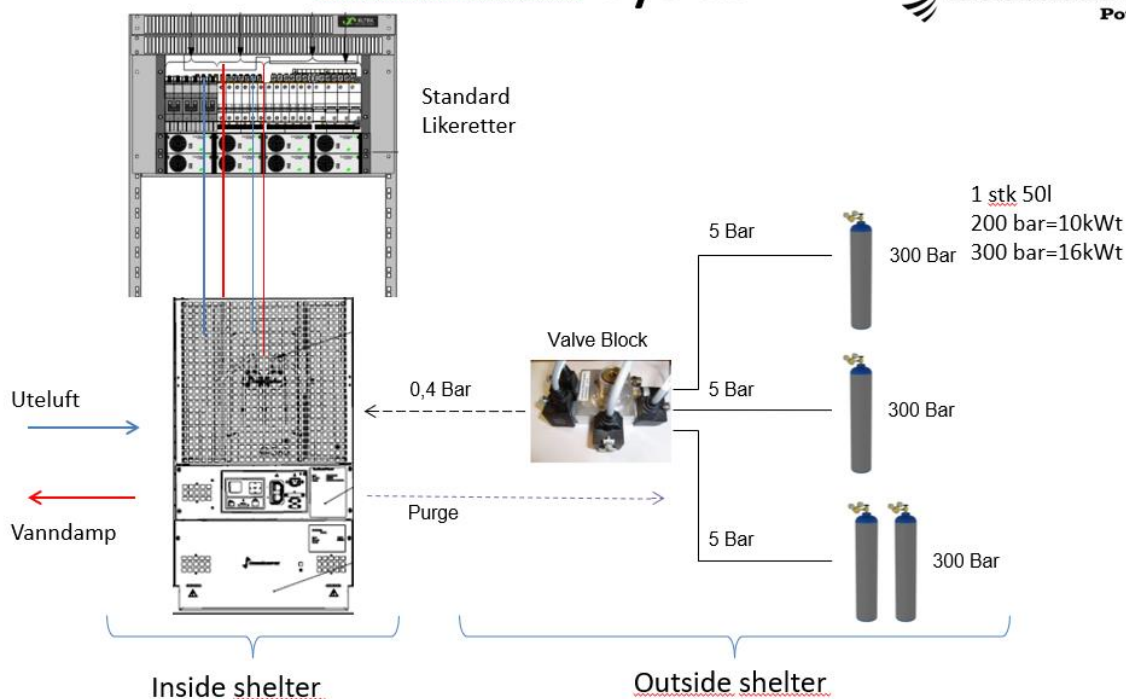
Løsningen består av brenselcelle(r), kondensatorbatteri, hydrogenflasker, slanger og ventiler. Figur 2 viser hvordan løsningen fungerer. Hydrogenflaskene er koblet på en ventil som senker trykket fra 200/300 bar til 5 bar, som igjen blir redusert til 0,4 bar i ventilblokken. Ventilblokken styrer tilførselen av hydrogen til brenselcellen. Brenselcellen konverterer hydrogengassen og innluft til elektrisitet, med vanndamp og varme som biprodukt av prosessen. Vanndampen blir ventilerert ut sammen med den varme avkastluften for å unngå unødvendig oppvarming av stasjonen. Fordi vanndampen ventileres ut av bygget vil det ikke være knyttet problematikk til kondens inne i stasjonen.

Brenselcellen som er valgt til pilotprosjektet er en 5kW rack-montert løsning. Denne finnes også i en størrelse på 1,7KW som vil være passende på små stasjoner med lavere forbruk.

Løsningen er modulær slik at anlegget kan utvides til å levere opptil 30kW.

Brenselcellen bruker noen få sekunder til å starte opp, og har derfor i likhet med nødstrømsaggregat behov for krafttilførsel i oppstartsperioden. På grunn av den korte oppstartstiden er det valgt å benytte et superkondensatorbatteri til å levere energi i oppstartsperioden framfor en batteribank slik som det er valgt for nødstrømsaggregat. superkondensatorbatteriet er mer kompakt enn en løsning basert på bly-batterier og produsenten lover bedre pålitelighet.

Fuel-cell system



Figur 2 - Oppsett av FC (Dantherm, u.å.)

Driftstiden avgjøres av antall hydrogenflasker som installeres. Årsaken til at det er valgt å ha flere mindre flasker framfor en stor tank er at det skal være mulig kunne sende ut en entreprenør med nye flasker dersom utfall blir langvarige. Siden mange av stasjonene ligger utilgjengelig til, spesielt om vinteren, er det gunstig å kunne frakte nytt drivstoff med snøskuter eller ATV.

Løsningen er utstyrt med en gassventil for hver flaske slik at det er mulig å bytte gassflasker under drift. På grunn av eksplosjonsfare er det krav til at hydrogenbeholderne er oppbevart med fri ventilasjon. Dette gjøres ved at flaskene blir installert i et utendørs skap.

Feil og feilretting

Erfaringene så langt i Telenors pilotprosjektet er at løsningen har svært god pålitelighet med 100% oppetid så langt. Den eneste registrerte feilen oppsto ved lynnedslag i stasjonen, der en komponent ble defekt, uten at det førte til nedetid for stasjonen. Fordi Telenor ikke har et tilstrekkelig stort utvalg stasjoner med FC til at det kan trekkes konklusjoner om driftssikkerhet og feil, faller det seg naturlig å se på hvordan en lignende løsning har prestert. Leverandøren forteller at det Danske nødnettet, «SINE», har benyttet deres brenselceller i over 10 år med over 8000 utfall der brenselcellene har hatt 100% suksessrate (Ballard,

2020). Dersom dette også viser seg å gjelde for bruk i det norske mobilnettet vil det være en stor forbedring over dagens løsninger.

Valg av brenselcelle

Det finnes en rekke forskjellige typer brenselceller for omdanning av hydrogen til elektrisitet. Til bruk i nødkraft til mobilstasjoner er det valgt å bruke brenselceller av typen «Polymer Electrolyte Membrane», PEM. Denne type brenselcelle har lav arbeidstemperatur, høy energitetthet og enkel skalerbarhet (Wang et al., 2011, s. 982)

Disse egenskapene gjør at PEM-FC egner seg godt til bruk i nødkraft til basestasjoner. Den lave arbeidstemperaturen gjør at brenselcellen rask blir driftsklar etter oppstart og den høye energitettheten gjør at løsningen blir mindre plasskrevende. Den enkle skalerbarheten gjør at brenselcellen egner seg til bruk i både stasjoner med lavt og høyt forbruk.

PEM er teknologien de fleste store bilprodusenter bruker til hydrogenbiler (Wang et al., 2011, s. 982) og det kan derfor tenkes at det på sikt vil bli en spillover-effekt fra utviklingen i bilindustrien som kan føre til lavere priser og bedre ytelse.

Tenkelige feil:

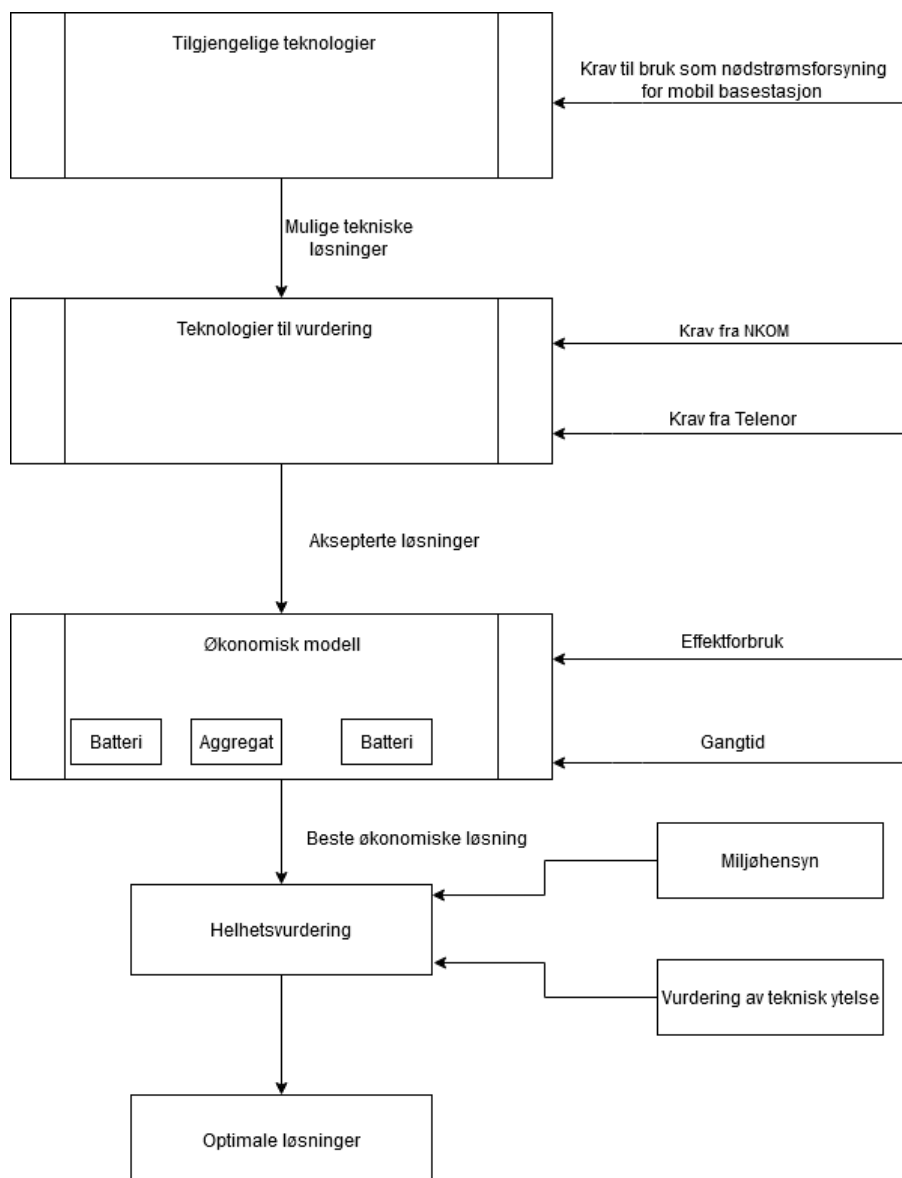
- lekkasjer i ventiler, slanger eller flasker. Dette vil kunne føre til alt fra små drivstofflekkasjer, til at løsningen ikke fungerer.
- feil på ventiler kan føre til at hydrogentilførselen ikke vil åpne, slik at løsningen ikke vil fungere

3. Metode

3.1. Metodeoversikt

Metoden som er anvendt i oppgaven vises i Figur 3.

Først identifiseres hvilke teknologier som finnes for nødstrømsforsyninger. Deretter vurderes løsningenes egnethet til bruk i mobilstasjoner. Dette gjøres ved å vurdere teknologiene i forhold til NKOMs og Telenors krav til ytelse. Teknologiene som er vurdert som aktuelle opp mot disse kravene, analyseres så i en økonomisk analyse. Resultatene fra den økonomiske løsningen inngår i en helhetlig vurdering hvor økonomi, miljøhensyn og teknisk ytelse danner grunnlaget for en anbefalt løsning.



Figur 3 – Teknoøkonomisk metode

3.2. Litteraturgjennomgang

Den mest brukte ressursen for å finne litteratur er NMBUs nettbibliotek der databasene Oria, Scopus og web of Science er blitt mest brukt. Der det ikke har latt seg gjøre å finne relevant litteratur på nettbiblioteket, er Google Scholar benyttet.

Ettersom fagfeltet denne oppgaven tar for seg er smalt og har en anvendt karakter, har det i flere situasjoner vært behov for å tilpasse søk for å få relevante søkeresultater. Søkene er utført ved metoden vist under, fra mest ønskelig til minst ønskelig:

Nødstrøm i teleindustrien → Nødstrøm → Generelt om teknologien.

For søk relatert til nødstrøm i teleindustrien er det meste av litteraturen svært spisset. Det ble ikke funnet artikler som direkte tar for seg problemstillingen i denne oppgaven. Det finnes artikler som tar for seg nødstrømsanlegg som kombinerer hydrogen og fornybar energi, og artikler som ser på lokal hydrogenproduksjon for teleindustrien, men ikke en vurdering av brenselceller opp mot de to etablerte standardene beskrevet over.

Søk etter teknologienes generelle bruk i nødstrøm har gitt vesentlig flere resultater enn søk etter nødstrøm i teleindustrien. Her finnes det fagbøker som gir relevant data som har vært svært nyttig i skriveprosessen.

I de tilfellene det har vært behov for å gjøre bredere søk har det ofte vist seg at teknologien som undersøkes ikke egner seg for bruk til nødstrøm. Dette forklarer mangelen på søkeresultater.

3.3. Krav og aktuelle løsninger

3.3.1. Krav

For design av nødstrømsanlegg til mobilstasjoner settes det absolutte krav i Ekomloven (Ekomloven, 2020) og fra NKOM (teletilsynet, 2014). Disse kravene er løsningen nødt til å tilfredsstille.

Videre har Telenor, som det tas utgangspunkt i i denne oppgaven satt en rekke krav som skal sørge for at stasjonene utformes på en måte som er både sikkerhetsmessig og økonomisk forsvarlig. Dette er beskrevet i Telenors «Policy for kraft og kjøling i Telenor Norge». Dette dokumentet er et internt dokument, slik at det ikke er anledning til vise til spesifikke krav i oppgaven, men kravene baserer seg i stor grad på standardene til ETSI (European

Telecommunications Standards Institute) og IECs miljøstandarder. (ETSI, 2019) er standarden for kraftforsyning for -48V DC-anlegg og er standarden som er mest aktuell for oppgaven. Standarden setter krav til kvalitet på spenning, strømtrekk, vern og hvordan anlegget skal håndtere utfall. For oppgaven er ikke behov for å se detaljene i disse standardene, fordi alle anleggene som sammenlignes i oppgaven oppfyller kravene til standarden og det skal derfor ikke påvirke resultatet i oppgaven.

Utover de tekniske kravene setter Telenor krav til at kostnadene i prosjektet er på et hensiktsmessig nivå.

3.3.2. Basestasjonenes kraftforbruk

For å kunne undersøke løsningens egnethet for stasjoner av forskjellig størrelse er det valgt å dele inn stasjonene i tre kategorier. Verdien for effektforbruk gjelder for basestasjoner der det er en operatør som har installert utstyr. På veldig mange av stasjonene befinner det seg mer enn en operatør og forbruket vil da gå tilsvarende opp på grunn av økt mengde utstyr. Det vil derfor beregnes opptil dobbel effekt av det som er oppgitt her for å kunne ta høyde for flere operatører.

- 1. Liten stasjon** Forbruk på under 1,5 kW. Det er en stor andel av disse stasjonene spredt rundt om i landet. Denne type stasjon finnes ofte i områder med lav befolkningstetthet. Kjentegnet for denne type stasjon er at det som oftest kun er én antenne pr. senderetning og teknologi (2G, 3G, 4G). Dette fører til at det er begrenset behov for ventilasjon slik at stasjonen kan være forholdsvis liten. Behovet for nødstrøm dekkes av batterier.
- 2. Middels stasjon** Forbruk på mellom 1,5 og 5kW. Disse stasjonene er gjerne fysisk større enn en liten stasjon, med nok utstyr til at det ofte er behov for aktiv kjøling i rommene utstyr befinner seg. Ved en stasjon på denne størrelsen er det vanlig at det er flere antenner pr. teknologi. Utstyret som generer radiosignal til antennene er det mest kraftkrevende på en mobilstasjon, og er største bidragsyter til det økte effektforbruket på stasjonene. Denne typen stasjon har ofte lavt nok forbruk til at nødstrøm dekkes av batterier.
- 3. Stor stasjon** Forbruk på over 5 KW. Dette er store stasjoner med mye utstyr. Denne typen stasjon befinner seg gjerne i tettere befolkede områder slik at langvarige

nettutfall er mer sjeldne. På grunn av det høye forbruket har ofte denne typen stasjon nødstrømsaggregat for å kunne dekke krav til oppetid ved feil.

3.3.3. Stasjonenes forbruksprofil.

En avgjørende faktor for dimensjoneringen av nødstrømsanlegg er peak-last til stasjonene. Den maksimale lasten stasjonen forbruker er nødt til å være den minimale effekten nødstrømssystemet dimensjoneres til. Forbruket på 48V-systemet på stasjonene varierer svært lite gjennom dagen og sesongene.

Komponentene som basestasjonen består av, har en tomgangslast som er svært lik kraftforbruket ved full last. Ifølge Ole Håvemoen, Ingeniør ved Telenors avdeling «Power & Cooling», er det noe variasjon i strømforbruk for antennesystemet ved forskjellige laster, som gir en forbruksprofil som ligger +/- 10% fra typisk målt last. (Samtale 14. april 2020). Dette fører til at det ikke er behov for å overdimensjonere nødstrømsanlegget nevneverdig for å kunne ta høyde for variasjoner i forbruk.

3.3.4. Aktuelle løsninger

Løsninger som sees på som aktuelle er nødt til å oppfylle alle krav som settes av NKOM og Telenor. Løsninger som analyseres i denne oppgaven må ivareta følgende krav:

- Flexibilitet som gjør at teknologien egner seg for en stor andel av basestasjonene. Med dette menes det at løsningen lar seg skalere til den aktuelle stasjonens behov
- Evne til å levere tilstrekkelig gangtid. Dersom den tekniske løsningen ikke kan levere opp til 72 timers reservertid er løsningen ikke aktuell for bruk til nødstrøm.
- Evne til å levere effekt fra 500-10 000W, slik at effektbehovet blir tilfredsstilt.
- Kostnad. Løsningen må kunne konkurrere med de eksisterende teknologiene på pris.
- Størrelse. Anlegget må være mulig å plasseres i en basestasjon av normal størrelse.
- Pålitelighet. Løsningen må ha en grad av pålitelighet som kan sammenlignes med eksisterende teknologier.

Dette vil si at kun teknologier som kan konkurrere med Batteribackup og nødstrømsaggregat på alle feltene beskrevet over vil vurderes som aktuelle kandidater.

3.4. Økonomiske forutsetninger

I de økonomiske beregningene er det gjort en rekke forutsetninger. Dette kapittelet vil forklare bakgrunnen for valget av disse.

3.4.1. Rentefot

Rentefoten i beregningene er satt til 5%. Nettselskapenes referanserente er basert på NVEs referanserente for 2020 og er satt til 5,47% (NVE, 2020), men i denne oppgaven er det valgt en noe lavere rente på 5%. Årsaken til at rentefoten er satt med utgangspunkt i NVEs forutsetninger, er at de tar utgangspunkt i at investeringer i strømnnett og drift er langsiktige, noe som vil være sammenlignbart med hvordan investeringer i et telenett gjøres.

3.4.2. Levetid

Levetid for batteribackup og aggregat er satt ut fra Telenors erfaring fra over 7500 stasjoner (Telenor, 2019) med nødstrømsforsyning. Levetid for FC er satt til verdien leverandøren av FC oppgir i spesifikasjonen for sitt produkt. Dette er gjort siden det ikke er nok erfaringsgrunnlag til å anslå levetid for FC i Telenors nett.

3.4.3. Kostnadsberegninger

For å kunne sammenligne investeringskostnader med forskjellig levetid og driftskostnader med ulike gjentakelsesintervaller, er det valgt å fordele kostnadene med annuitetsmetoden. Investeringskostnadene er fordelt ut fra forventet levetid til teknologiene, der det er forventet at nye investeringer må gjøres for videre drift. Ved å beregne kostnadene slik, vil det være mulig å sammenligne kostnader med forskjellig levetid på et så likt grunnlag som mulig.

Driftskostnadene fordeles på samme måte ved at kostnadene for drift justeres til en sum pr. år, ut fra hvor ofte kostnaden må gjentas. Investeringskostnader og driftskostnader vil bli summert slik at kostnadene til de forskjellige teknologiene vil kunne sammenlignes ved en kostnad for hvert intervall.

Kostnadene for utstyr for teknologiene batteri og aggregat er hentet fra Telenors leverandører og vil være de reelle innkjøpskostnadene for innkjøp gjort 26.03.20.

Data for kostnader er hentet inn som faste priser der det er mulig. Der det ikke foreligger avtaler om fast pris, estimeres kostnadene som gjennomsnittspris for Telenors tidligere

installasjoner av samme type. Disse verdiene er estimater og det vil derfor være noe usikkerhet knyttet til nøyaktigheten til disse tallene. Usikkerheten består av variasjoner i lokasjon og hvilket firma som blir brukt til å utføre arbeidet.

Der det har vært behov for å regne på strømforbruk er 1,2kr/kWh blitt brukt. Dette skal dekke kostnad for både strøm og nettleie.

3.4.4. Valg av utgangspunkt for beregningene

For å utføre den økonomiske analysen på en måte som sammenligner teknologiene på et likt grunnlag, er det flere alternativer:

1. En økonomisk analyse av komponentene som nødstrømsanlegget består av, i tillegg til kostnader for installasjon av utstyret og driftskostnadene som hører med. Dette kan sies å være en rettferdig sammenligning av teknologiene ettersom det kun er kostnadene som direkte er knyttet til de gitte teknologiene som blir sammenlignet. Ulempen med denne metoden er at kostnader til bygg som teknologiene krever ikke vil bli vurdert.
2. En analyse som tar utgangspunkt i at det skal bygges en ny stasjon slik at teknologiene vil ha kostnadene med bygningstilpasning inkludert. Dette kan sees på som den beste metoden å sammenligne på siden alle kostnader som er knyttet til å etablere en løsning vil bli inkludert.
3. En analyse som tar utgangspunkt i at en eksisterende stasjon skal fornyes. Dette vil være tilfellet for stasjonene der det er behov for fornying av nødstrømsanlegget på en stasjon som er i drift. I dette tilfellet vil det være mest hensiktsmessig å ta utgangspunkt i at stasjonen har et eksisterende batterirom siden omtrent 95% av mobilstasjonene har denne løsningen i dag.

I den økonomiske analysen vil metode 2 og 3 bli undersøkt. Metode 2 vil gi svar på hvilken teknologi som i helhet leverer den beste løsningen. Det vil derfor bli lagt mest vekt på resultatet som denne metoden gir.

Metode 3 vil gi resultatet som er mest aktuelt for Telenors stasjoner, men løsningen vil gi batteri en sterk konkurransefordel. Denne metoden vil derfor bli brukt som grunnlag for å se

påvirkningen bygningskostnader vil ha på resultatet.

Metode 1 blir forkastet fordi den ikke vil gjenspeile de reelle kostnadene for en utbygging.

3.4.5. Excel-modell

Dataene blir samlet i Excel der de vil bli fordelt inn i Capex og Opex.

For å ta høyde for forskjellig levetid på teknologiene blir investeringskostnadene fordelt ved annuitetsmetoden til en kostnad pr. år. Dette er gjort for at det skal kunne være mulig å sammenligne teknologiene på et mest mulig likt grunnlag.

Driftskostnadene blir fordelt med annuitetsmetoden med hensyn på frekvens, til en kostnad pr. år.

Modellen bygges slik at brukeren legger inn ønsket effektbehov og gangtid og Excel Solver blir brukt til å kalkulere optimal løsning for hver teknologi.

Løsningsmetoden som er valgt i Solver er «ikke-lineær GRG» som gir muligheten til å inkludere boolske variabler i den økonomiske modellen. Dette er en nødvendighet for å inkludere kostnader som ikke vokser lineært og kostnader som inntreffer ved gitte grenser.

For datagrunnlaget som skal presenteres i oppgaven er det valgt å analysere for effektforbruk på 500-10000W i intervaller på 500W, med krav til driftstid 4,8,12,24,36, 48 60 og 72 timer.

Dette er gjort for å kunne vurdere optimale løsninger fra svært små stasjoner og opp til store stasjoner. Med disse grensene er det sannsynlig at det er intervaller hver av de analyserte teknologiene er den optimale løsningen, slik at skjæringspunktene mellom teknologiene vil være tydelige.

Den optimale løsningen for hver teknologi og intervall vil bli sammenstilt og vurdert opp mot hverandre for å kartlegge hvilken av de tre løsningsalternativene som vil gi den optimale løsningen i hvert scenario. Resultatene fra den økonomiske modellen vil bli vurdert opp mot miljøhensyn og praktiske hensyn for å konkludere i hvilken teknologi som bør benyttes i hvert intervall.

3.4.6. Formler/begreper

Nødstrømsforsyning. Brukes om en løsning som kan levere elektrisk kraft ved bortfall av energiforsyning fra strømnettet.

Batteri, batteribank. Brukes om den samlede løsningen som leverer energi fra et antall batterier for å levere nødstrøm

Aggregat, dieselaggregat, nødstrømsaggregat. Brukes om teknologien som består av en dieselmotor med generator som brukes til nødstrømsforsyning

Annuitet: $a = V_0 * \frac{(1+p)^{n*p}}{(1+p)^n - 1}$ Fordeler verdien V_0 til en rekke med like store beløp, der p er rentefot og n er antall perioder.

Investeringskostnad. Kostnadene som blir betalt i oppstartsfasen av prosjektet. Dette er det det koster å etablere stasjonen.

CapEx, Capital Expenditure. Den årlige beregnede kostnaden for avskrivning og rente av innkjøpskostnaden

Driftskostnad. Dette er kostnadene tilknyttet driften av stasjonen.

OpEx, Operational Expenditure. Den årlige beregnede kostnaden for avskrivning og rente av innkjøpskostnaden

Fuel Cell (FC) brukes i oppgaven om teknologien tilknyttet brenselceller og om selve brenselcellen som er en del av løsningen. Dette begrepet brukes på samme måte som aggregat og batterier

EKOM, Elektronisk KOMmunikasjon

FEKOM, Forsterket EKOM, Forsterket Elektronisk KOMmunikasjon

3.5. Helhetlig analyse/anbefalinger

Vurderingen av ytelse vil avgjøre hvilke teknologier som vil tilfredsstillere behovene for nødstrømsforsyning. Analysen av ytelse har derfor en sentral rolle ved at den avgjør hvilke teknologier som vil bli vurdert i den helhetlige analysen.

Den helhetlige analysen vil bli gjort ved å vurdere ytelsen til løsningene opp mot resultatene som den økonomiske analysen gir. Det vil bli lagt mest vekt på resultatene fra den økonomiske analysen fordi det vil være den største faktoren når det skal investeres i nødkraftsystemer, og fordi alle teknologier som når dette stadiet skal oppfylle kravene til ytelse på en tilfredsstillende måte.

Ytelseskravene vil være avgjørende for den helhetlige anbefalingen der hvor det er liten forskjell i kostnad mellom teknologiene.

4. Resultater

4.1. Vurdering av egnethet av vurderte teknologier

I dette kapitlet avgjøres hvilke teknologier som er egnet for bruk i mobilstasjoner ved å vurdere teknologienes styrker og svakheter sett opp mot batterier og aggregat som er teknologiene som benyttes i dag.

De forskjellige teknologienes styrker og svakheter, samt resultatene er samlet i Tabell 1

Batterier

Teknologien har en enkel oppbygning bestående av få komponenter. Dette fører til at teknologien er pålitelig. Batteriene kan levere energi øyeblikkelig slik at teknologien ikke har oppstartstid. Batteribankene er modulbaserte slik at batteribankens størrelse lett kan tilpasses en stasjons behov. Disse egenskapene gjør at batterier er egnet for bruk i nødstrømsforsyning

Aggregat

Aggregat er en teknologi som er mye brukt i nødstrømsforsyninger. Aggregatene kan skaleres etter en stasjons størrelse, men har høy etableringskostnad på grunn av teknologiens kompleksitet. Aggregat har oppstartstid som fører økt kompleksitet ettersom det må installeres en teknologi som leverer energi i tidsrommet aggregatet bruker på å starte. Aggregat kan skaleres til å drive svært store laster, og er spesielt egnet til oppgaver der det er stor last og/eller lang driftstid. Den høye kompleksiteten gjør at nødstrømsaggregat er utsatt for feil. For å sikre tilstrekkelig pålitelighet er det behov for hyppig vedlikehold. Aggregat er egnet for bruk i mobilstasjoner, spesielt på grunn av evnen til å levere stor effekt til en konkurransedyktig pris.

Kinetisk UPS

En stor fordel med denne løsningen er at svinghjulet kan bidra til å stabilisere nettspenningen dersom denne er ustabil. I Norge er nettspenningen stabil (NVE, 2004, s.32) og det er derfor ikke behov for stabilisering av spenningen på mobilstasjoner. På grunn av at energien er lagret i et svinghjul er det ikke mulig å lagre tilstrekkelig energi til å gi lange gangtider for basestasjoner. Typisk er det under 2 sekunders gangtid ved bruk av kun svinghjul. Det er mulig å oppnå økt gangtid ved at motoren som driver svinghjulet forsynes av en batteribank. Denne løsningen vil ikke yte bedre i det norske mobilnettet enn batterier,

og vil på grunn av høyere kompleksitet og kostnad, være dårligere egnet til bruk enn de eksisterende løsningene. Det konkluderes dermed med at kinetisk UPS ikke er egnet for bruk i det norske mobilnettet.

UPS basert på trykkluft

Ettersom det ikke finnes kommersielt tilgjengelige anlegg for effekter og gangtider som kan benyttes i mobilstasjoner, konkluderes det med at denne teknologien er uegnet for bruk i mobilstasjoner.

Hydrogen-brenselceller

Løsningen er skalerbar, både når det kommer til effekt ved at størrelsen på brenselcellen kan endres, og ved at mengden hydrogen lagret på flasker kan varieres for å få ønsket gangtid. I likhet med aggregat har FC oppstartstid som fører til at det er behov for en energikilde som dekker oppstartstiden. Stor fleksibilitet og konkurransedyktig pris gjør at konkluderes med at denne teknologien er egnet for bruk i nødstrømsanlegg.

Superkondensatorbatteri

Superkondensatorbatteri kan i likhet med batterier levere energi momentant slik at de er klare til drift momentant. Energitettheten er vesentlig lavere enn for konvensjonelle batterier, som fører til at de i dag har vesentlig høyere pris pr. kWh enn bly-batterier. Det konkluderes derfor med at superkondensatorbatterier ikke er egnet til bruk i mobilstasjoner, ettersom de blir utkonkurrert av blybatterier på pris.

Tabell 1 - Oppsummering av teknologiers egnethet

Teknologi	Fordeler	Ulemper	Egnethet
Blybatterier	<ul style="list-style-type: none"> • Bransjestandard for små til medium-store stasjoner • Billig • modulær oppbygning • Ikke behov for transport av drivstoff • Kan levere energi øyeblikkelig 	<ul style="list-style-type: none"> • Kort levetid • Lav energitetthet • Varmeutvikling ved drift • tomgangstap 	Egnet
Aggregat	<ul style="list-style-type: none"> • Bransjestandard for store stasjoner • Kan levere svært høy effekt • Lang gangtid • Høy energitetthet for drivstoff 	<ul style="list-style-type: none"> • Leverer ikke energi øyeblikkelig • Stort behov for kjøling • Høy grunnpris • Kompleks • Høyt vedlikeholdsbehov • Høy feilrate • Høy varmeutvikling ved drift 	Egnet
Kinetisk UPS - svinghjul	<ul style="list-style-type: none"> • Mister ikke kapasitet over tid • Leverer energi øyeblikkelig • Lav kompleksitet • Bidrar til stabilisering av forsyningsspenning 	<ul style="list-style-type: none"> • Uegnet Lav gangtid • Plasskrevende • Ved utvidelse med batterier er løsningen kompleks 	Uegnet
Trykkluft	<ul style="list-style-type: none"> • Stor kapasitet 	<ul style="list-style-type: none"> • Krever spesielle grunnforhold for å kunne bygges • Uegnet for lave energimengder 	Uegnet
Hydrogen	<ul style="list-style-type: none"> • Fleksibel • God fleksibilitet i effektleveranse og gangtid • Høy driftssikkerhet • 	<ul style="list-style-type: none"> • Relativt ny teknologi i telebransjen • Eksplosjonsfarlig drivstoff 	Egnet
Superkondensator	<ul style="list-style-type: none"> • Kan levere høy effekt momentant • Lang levetid 	<ul style="list-style-type: none"> • Høy pris/kWh • Lav energitetthet 	Uegnet

4.2. Økonomisk analyse

4.2.1. introduksjon

I dette kapittelet vil de tre aktuelle teknologiene bli sammenlignet.

Det er valgt å ta utgangspunkt i to caser. En ny stasjon som ikke har eksisterende infrastruktur, og en eksisterende stasjon med batterirom. Krav til gangtid vil være 4,8,12,24,36, 48 60 og 72 timer, med effektforbruk på 500-10000W i intervaller på 500W.

4.2.2. Batteribackup

Capex/Investeringskostnader

For batteribankene er installasjonsprosessen forholdsvis ukomplisert.

investeringskostnadene er kun knyttet til selve innkjøpet av batterier, moduler, monteringsmateriell og installasjonsarbeid. I tillegg til dette vil eventuelle investeringskostnader til bygningstilpasning tilkomme. I Tabell 2 er alle investeringskostnader samlet.

Tabell 2 – innkjøpskostnad for batteribackup, priser er innkjøpspriser pr. enhet

Komponent	Innkjøpskostnad
Batteristreng 200Ah	7 443
Batteristreng 1000Ah	43 255
Innstallasjon 200 Ah 1. bank	5 728
Innstallasjon 200 Ah 2. bank+	3 430
Innstallasjon 1000 Ah 1. bank	12562
Innstallasjon 1000 Ah 2. bank+	10 482
2x Rack til 200Ah batteri inkl kabling	6 250
Rack til 1000Ah batteri inkl kabling	9 552
Ekstra likerettermoduler	2 000
bygningkostnader for batterirom	300 000

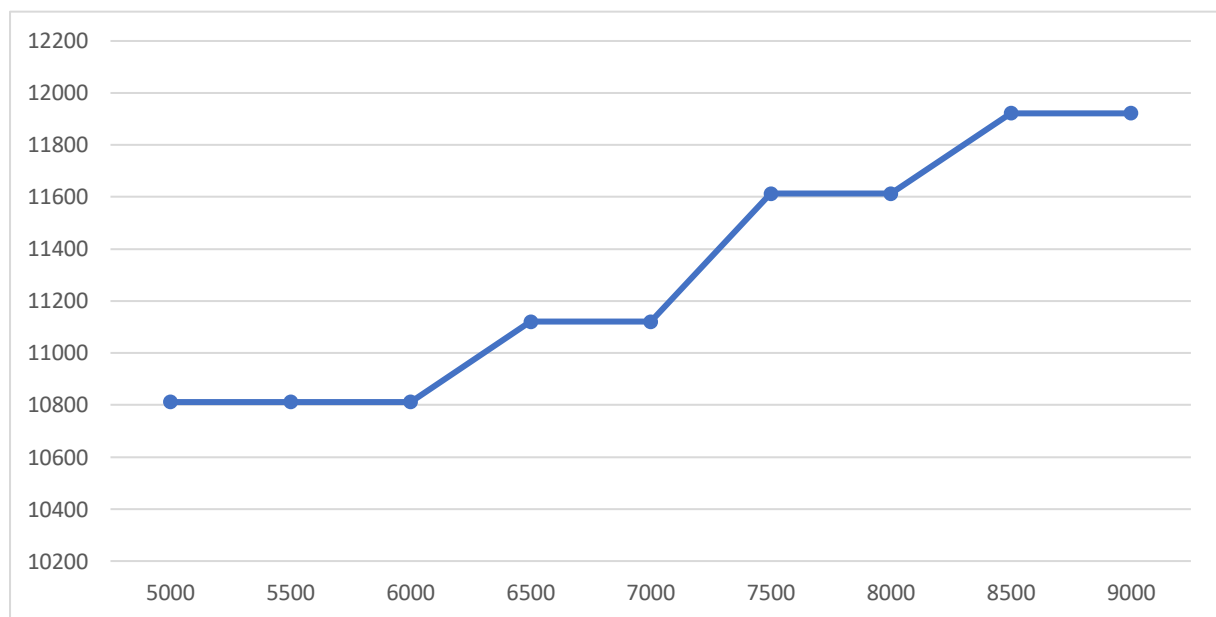
Kostnadene i Tabell 2 er innkjøpspriser som ikke er amortisert, og er Telenors innkjøpspriser. Det eneste unntaket er posten «bygningkostnader for batterirom» som er et estimat for en gjennomsnittsinstallasjon. De to første kolonnene viser priser for batterier av størrelsen 200Ah og 1000Ah. Det kommer fram av prisene at det vil være billigere å kjøpe inn 5x200Ah batterier, enn 1x1000Ah. Slik vil det ikke være når levetid blir tatt i betraktning da

batteribanken på 1000Ah har 15 års forventet levetid, mens banken på 200Ah har 8 års forventet levetid.

postene for installasjonskostnad er delt inn i en pris for første bank og en pris for påfølgende batteribanker. Dette er fordi prisen for første bank inkluderer kostnad for reise og forberedelse av arbeid.

Postene for Rack er prisene for stativene batteriene må monteres i. Det er plass til en streng 1000Ah pr stativ og to strenger 200Ah batterier pr stativ. Prisen for disse inkluderer også kabler for sammenkobling av batterier.

Posten for ekstra likerettermoduler tilkommer når stasjonens last overstiger 6000W. Dette er fordi likeretterne har tre moduler på 2kW installert som standard. Dersom stasjonen har høyere forbruk enn dette tilkommer det en modul pr begynte 2kW. I resultatene fra den økonomiske modellen vil dette vises ved 6500W og 8500W. Av Figur 4 kan effekten av dette sees i kostnadsøkningen mellom 8000W og 8500W. Her er den tekniske løsningen den eksakt samme bortsett fra at det er behov for en ekstra likerettermodul.



Figur 4 – kostnadsøkning for batterimoduler. Kostnad pr. år for batterier, 4 timer gangtid

Bygningskostnaden for batterirom er prisen for å etablere rommet og utførelse av brannverntiltak.

Opex/ Driftskostnader

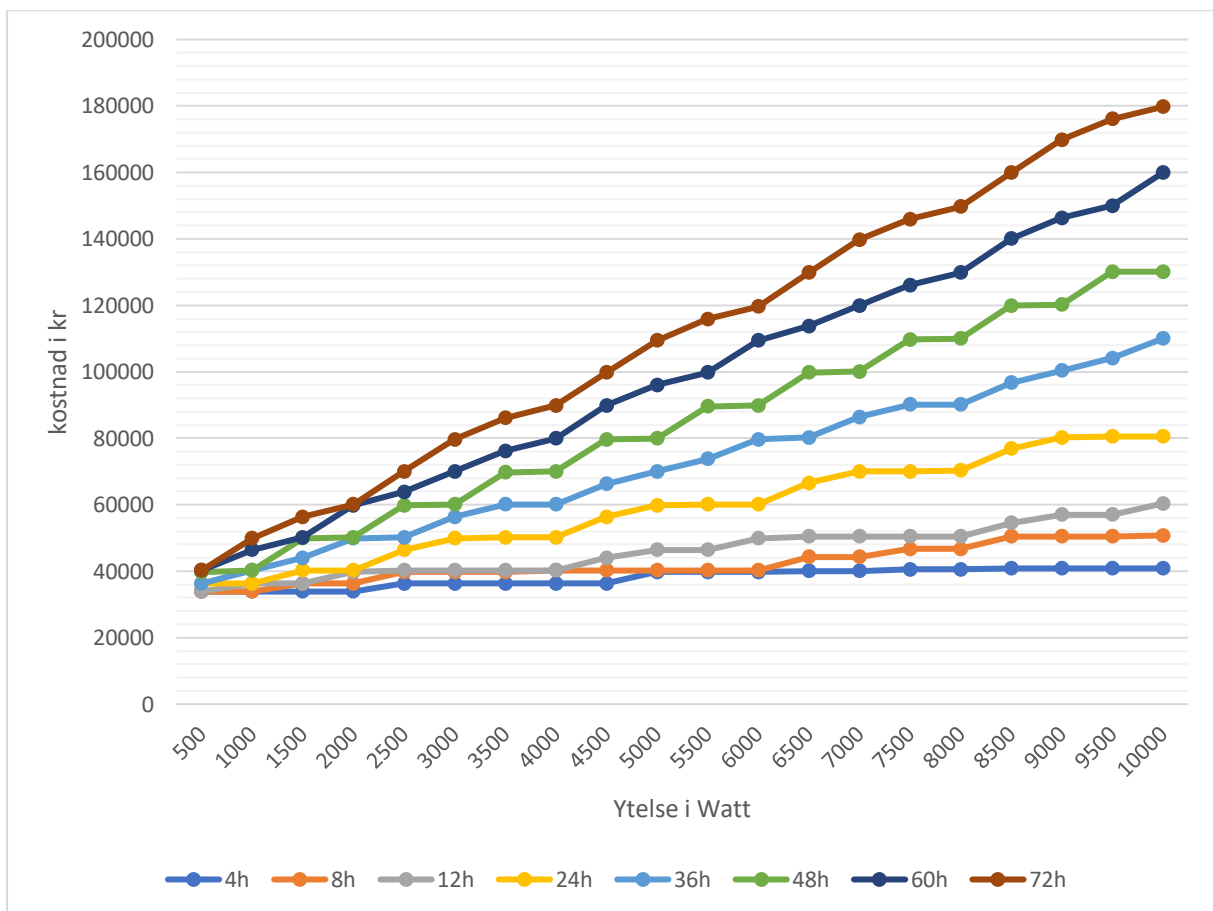
Driftskostnadene er små for batteriene. Det er ikke behov for vedlikeholdsarbeid på batteriene i levetiden deres. Tabell 3 viser årlige driftskostnader tilknyttet strøm til vedlikeholdslading av batterier og kjøling av batterirom.

Tabell 3 - Opex for batterier, driftskostnader pr. år pr. enhet.

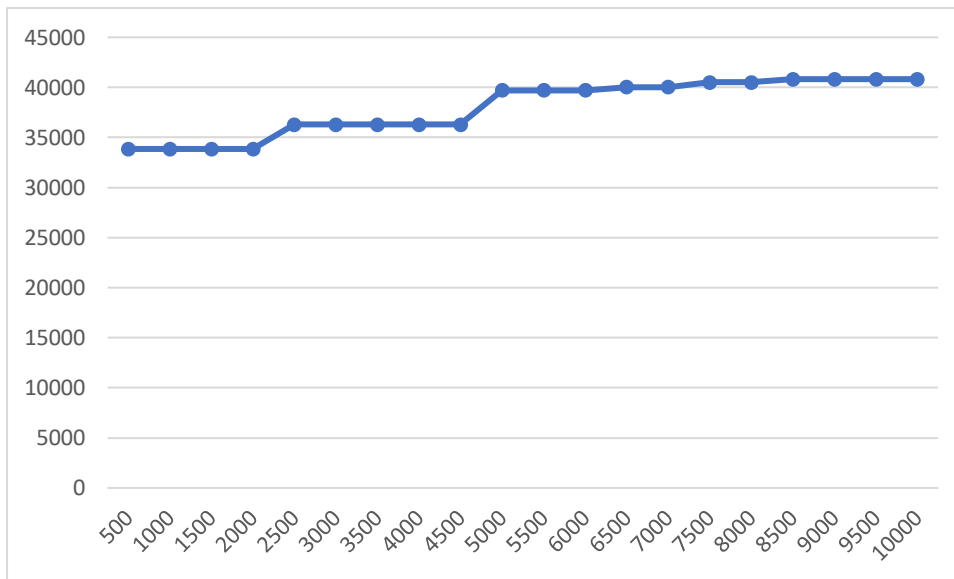
Komponent	Opex
Vedlikeholdslading 200Ah	765
Vedlikeholdslading 1000Ah	3 825
Kjøling	1 180

Resultater

Figur 5 viser kostnader for batteribackup inkludert bygningskostnader. Det er tydelig av grafen at prisutviklingen er relativt lineær, med brattere stigning for lange gangtider. Bygningskostnadene for batterirommet med capex på 28 903kr/år utgjør en betydelig andel av kostnadene, spesielt ved lavt effektbehov og/eller lav gangtid.



Figur 5 - Totale kostnader for batteribackup inkludert bygningskostnader

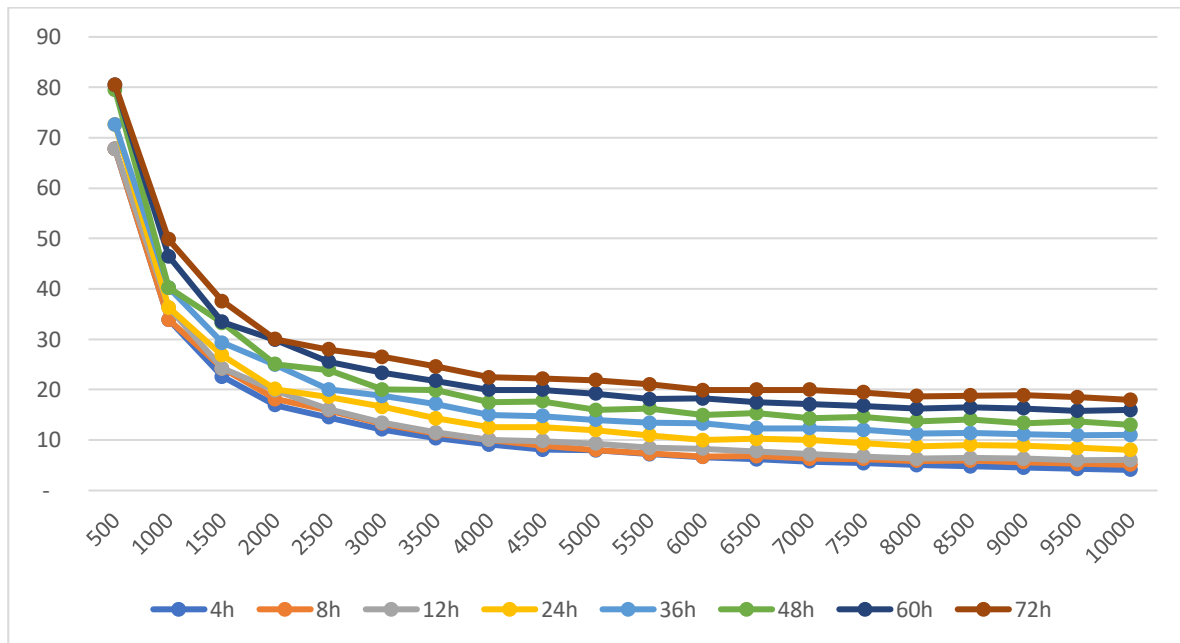


Figur 6 - Totale kostnader for batteribackup inkludert bygningskostnader, 4 timer gangtid

Figur 6 viser totale kostnader pr. år for fire timers gangtid inkludert bygningskostnader. Bygningskostnadene står for 90,6% av investeringskostnadene ved et forbruk på 500-2000W og 82,4% for 8500-10 000W. Det er tydelig at der det er et lavt behov for batterikapasitet vil kostnadene for bygningstilpasning være avgjørende for om batteribackup vil være den optimale løsningen. De to store hoppene i kostnad ved skillet 2000-2500W og 4500-5000W skyldes at den optimale løsningen krever en økning i batterikapasitet for å tilfredsstille kravene. Siden minste økning i batterikapasitet er på 200Ah vil det ved lave gangtider og laster være den samme optimale løsningen ved flere intervaller. Et eksempel på dette sees i Figur 6 der totalkostnadene pr. år forblir de samme mellom 2500W og 4500W. Tabell 4 er en oversikt over antall 200Ah og 1000Ah batterier som gir den optimale løsningen for fire timers gangtid. Et interessant funn er at det er svært lav prisforskjell mellom å investere i tre 200Ah batterier (kolonne 7000W i tabellen) og ett 1000Ah batteri (kolonne for 7500W i tabellen). Modellen gir at det er en endring i årlig kostnad på 1,2% for å øke kapasiteten fra 600Ah til 1000Ah. Dette vil sannsynligvis være verdt merkostnaden fordi det øker muligheten for utbygging av stasjonen på et senere tidspunkt uten å måtte oppgradere nødstrømsanlegget.

Tabell 4 viser at løsningen endres kun få ganger ved endring i ytelse. Dette kommer av at en økning i 200Ah vil være en stor prosentvis økning i kapasitet. Dette fører til at det vil være en stor overkapasitet i overgangene. Ser man på endringen i kapasitet mellom 2000W og

2500W vil kapasiteten doubles. Endringen i behov for kapasitet endres fra 166Ah til 208Ah. Det vil si at i at for en stasjon med 2500W effektbehov, har stasjonen 92% overkapasitet.



Figur 7 - Totale kostnader/år pr. Watt

Figur 7 viser de totale kostnadene pr Watt. Det er tydelig av grafen at kostnaden pr effekt er høy ved lave effektbehov.

Figur 8 viser kostnadene for 72 timer gangtid. Ved 3 døgns gangtid er det tydelig at bygningskostnader spiller en vesentlig lavere rolle enn for Figur 6 med 4 timer gangtid.

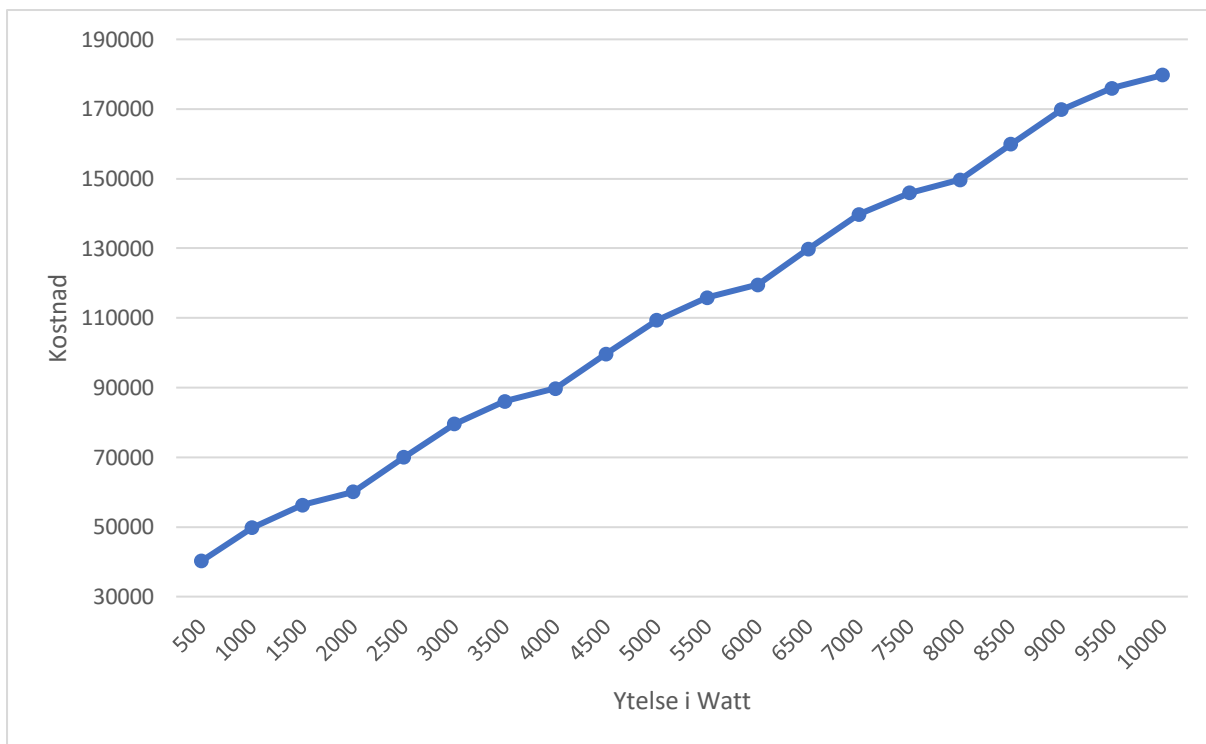
For en gangtid på 72 timer vil bygningskostnaden ved 500W være 82,1% av investeringskostnaden, mens ved 10kW vil den være 24,4%. dette betyr at batteribackup er langt mindre følsom for bygningskostnad ved høyt effektbehov enn den er ved lavt. Dette forklarer hvorfor Figur 7 har høy pris pr. watt for lavt effektbehov.

Tabell 4 - Antall batterier i den optimale løsningen inkl. totale kostnader for 4 timers gangtid

W	200Ah	1000Ah	Totale kostnader pr. år
500	1	0	33 853
1000	1	0	33 853
1500	1	0	33 853
2000	1	0	33 853
2500	2	0	36 300
3000	2	0	36300
3500	2	0	36 300
4000	2	0	36 300
4500	2	0	36 300
5000	2	0	39 714
5500	2	0	39 714
6000	3	0	39 714
6500	3	0	40 024
7000	3	0	40 024
7500	0	1	40 515
8000	0	1	40 515
8500	0	1	40 824
9000	0	1	40 824
9500	0	1	40 824
10000	0	1	40 824

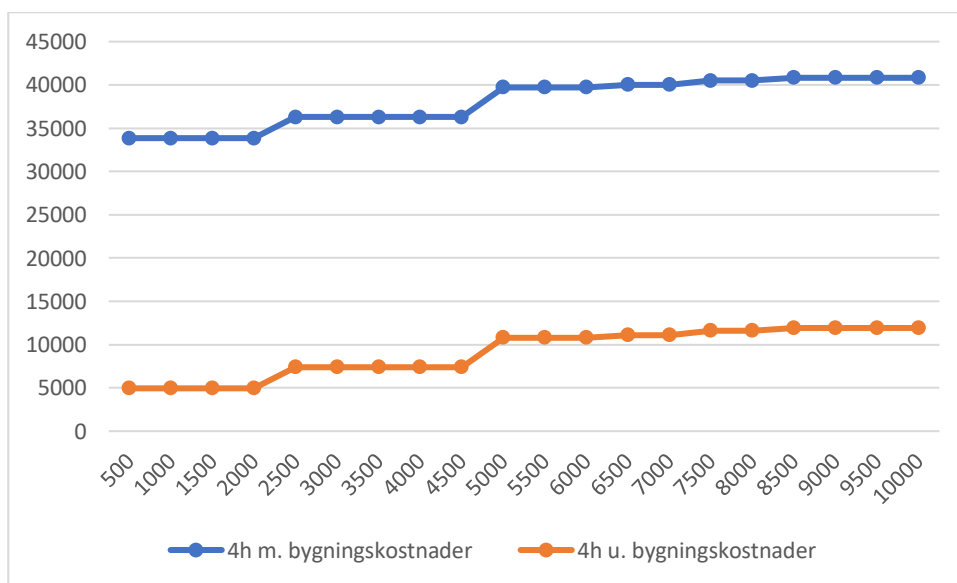
Kostnader til vedlikehold er høy med 12-33% av totalkostnaden. Dette skyldes at det er en stor kostnad knyttet til vedlikeholdslading av batteriene.

I motsetning til Figur 6 endres den optimale løsningen for hvert effektintervall i Figur 8. Dette fører til en mer lineær økning i kostnadene. Den lange gangtiden fører til et stort behov for batterikapasitet der det er behov for 15000Ah for 72timer ved 10kW, mens det kun er behov for 833Ah ved 4timer.



Figur 8 - Totale kostnader pr. år for batteribackup inkludert bygningskostnader, 72 timer gangtid

Figur 9 viser forskjellen i løsningen i modellen med og uten bygningskostnad. Løsningene er identiske sett bort fra at total kostnad pr år økes med 28 903kr/år, som er investeringskostnaden for bygningstilpasning pr. år.



Figur 9 - Totale kostnader for 4 timer gangtid med og uten bygningskostnader

4.2.3. Aggregat

Capex/investeringskostnader

For diesellaggregat er det store investeringskostnader for å etablere anlegget.

Den første store investeringen er selve aggregatet. Grunnprisen for et aggregat er høy, men det er ikke store merkostnader for større kapasitet. I de økonomiske utregningene er det brukt reelle priser fra Telenors leverandør. I Tabell 5 ser man at en dobling i kapasitet koster relativt lite, mellom 6-13%. Av dette er det tydelig at investeringskostnaden pr kVA vil være mye lavere for store aggregater, slik at det er forventet at aggregat vil være konkurransedyktig først ved høye laster.

Styringssystemet som gjør at aggregatet operer automatisk er inkludert i innkjøpsprisen til aggregatet.

Tabell 5 – Investeringskostnad for Nødstrømsaggregat. Priser i kostnad pr. enhet

Komponent	Innkjøpskostnad
Aggregat 20kVA	186 662
Aggregat 40kVA	214 346
Aggregat 60kVA	227 085
Aggregat 80kVA	245 728
El-installasjon + bygningstilpasning	480 000

Den 2. store investeringskostnaden er el-installasjon og bygningstilpasning. Disse kostnadene er estimerte og vil derfor ha usikkerhet knyttet til seg.

Kostnaden for el-installasjon består av det elektriske arbeidet med å koble generatoren på nett, kostnad til elektronikk til automasjonen av aggregatet og arbeid med installasjon. investeringskostnaden for el-installasjon og bygningstilpasning har en estimert snittpris på 480 000kr.

Bygningstilpasningen består av kostnad for å tilfredsstille krav til sikkerhet. Dette inkluderer brannsikring av rom og nedgraving av bunkertank.

Opex/Driftskostnader

Driftskostnadene for aggregat består av en rekke poster som er vist i Tabell 6.

Aggregatene har behov for jevnlig vedlikehold ved gitte tidsintervaller. Postene for «periodisk vedlikehold», hovedtilsyn, forbrukstest og «service av motorstyrt bryter» regnes som normalt vedlikehold. Når tilsyn utføres vil det etterfylles diesel ved behov. Hvert 5. år må dieselen skiftes dersom den ikke har blitt brukt. Den siste driftskostnaden for aggregat består av strøm til romoppvarming.

Tabell 6 - driftskostnad for nødstrømsaggregat. Priser pr enhet

driftskostnad	Intervall i år	Pris
Periodisk vedlikehold	0,5	3 000
Hovedtilsyn	2	8 000
Diesel skifte	5	10 000
Forbrukstest	1	1 091
Romoppvarming	1	3 273
Deler olje etc. til service	1	1 500
Service motorstyrt bryter	5	3 049

Resultater

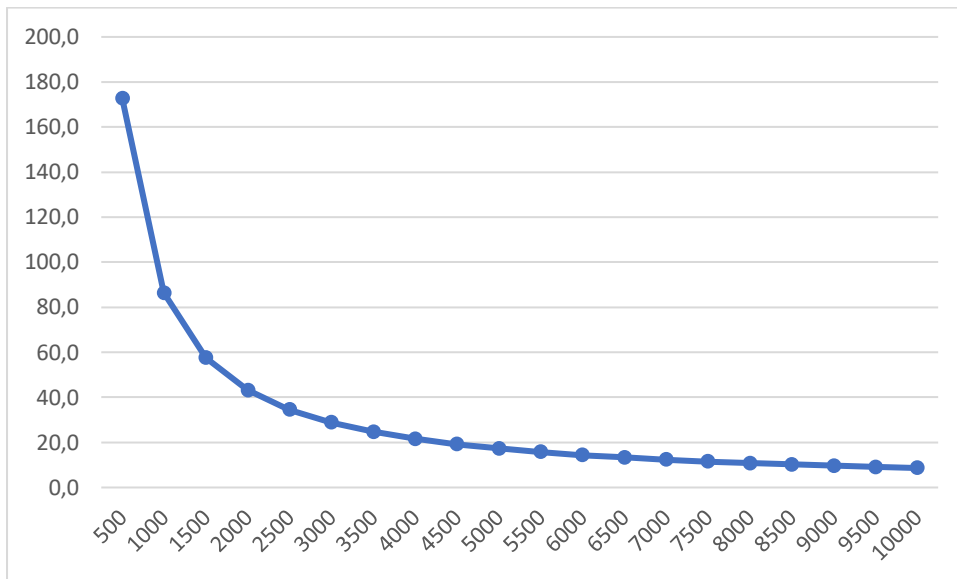
Kostnadene for aggregat er den samme for alle intervaller i modellen. Modellen gir at en total kostnad på 72 675kr er den optimale løsningen. Dette kommer av at det minste aggregatet som er tilgjengelig har en størrelse på 20kVA, som er tilstrekkelig for selv de største stasjonene som undersøkes i denne oppgaven. Årsaken til at et så stort aggregat benyttes er at mindre aggregat enn dette ikke regnes som pålitelig nok. Fordi bunkertanken også er tilstrekkelig stor for 72 timer drift, vil heller ikke denne føre til endringer i den optimale løsningen.

Det vil ikke være en endring i modellen før effektkravet overstiger 20kW.

Tabell 7 - Fordeling av kostnader for aggregat

	kostnad
Capex	53 495
Opex	19 180
Total	72 675

Kostnadene fordeler seg som vist i Tabell 7 der investeringskostnadene pr. år er 73,6% av totalkostnaden pr. år, mens vedlikeholdskostnader er på 23,4% av totalkostnaden pr. år.



Figur 10 - Totalkostnad/Watt, Nødstrømsaggregat

Figur 10 viser totalkostnad pr. Watt for nødstrømsaggregat. Fordi totalkostnaden for aggregat er konstant i alle intervallene vil det være en høy pris pr. watt ved lavt krav til ytelse. Dette fører til at aggregat er lite konkurransedyktig ved lave laster

4.2.4. Brenselcelle

Capex/Investeringskostnader

Investeringskostnadene for FC er delt inn i postene gitt i Tabell 8. Brenselcellene er tilgjengelige i størrelsene 1,7kW og 5kW. En sammenligning av de to brenselcellene gir at det er dobling av pris for en tilnærmet tredobling av effekt, slik at FC på 5kW vil være billigere pr. W enn FC på 1,7 kW. I investeringskostnaden for Brenselcelle er det inkludert kondensatorbatteri. Investeringen i brenselcellen vil stå for den største andel av anleggsinvesteringen for både små og store anlegg. Dersom det er to eller flere 5kW FC på en stasjon påløper også kostnaden for mastermodul for å kunne samkjøre flere enheter. Ved å ha dette som en ekstern komponent, er løsningen mer fleksibel, og brenselceller er mer konkurransedyktige på små anlegg der det ikke er behov for styreenheten. Det er tilstrekkelig med én alarmmodul pr anlegg. Kostnaden for rack er stativet som utstyret monteres i. Det er behov for et rack for installasjon av FC m/ superkondensator, alarmmodul og eventuelt mastermodul. Det er plass til dette inkludert to 5kW FC i et rack. Brenselcellen

trenger luftinntak og uttak. Kostnadene for dette er samlet i posten «ventilasjon av Fuel Cell». Fordi brenselcellen transporterer ut varmen som den generer med utkastluften, er det ikke behov for ytterligere ventilasjonstiltak for implementering av FC.

Det er behov for en regulator pr. flaske hydrogen. Dette vil presse opp prisen på stasjoner der det er behov for lang gangtid og dermed et høyt antall flasker. Lagring av hydrogenbeholdere gjøres ved at de blir installert et utendørs flaskeskap. resterende investeringskostnader er til kabling og installasjon og idriftsetting av anlegget.

Tabell 8 - Capex for FC. Priser pr. enhet

Komponent	kostnad
FC gen 5,0 kW incl. Ultracap	214 258
FC gen 1,7 kW incl. Ultracap	121 247
Regulator 200Bar 50l	1 257
Regulator 300Bar 20l	1 257
Rack	3 005
Mastermodul for mer enn 1 enhet	11 000
Alarmkabel	696
kabel til strømtilførsel	841
Installasjon og idriftsetting	19 170
ventilasjon av Fuel Cell	4909
Utvendig flaskeskap	15 000
Alarmmodul	4661

Opex/Driftskostnader

Fordi brenselcelle-teknologien ikke er i bruk andre steder enn i testanlegg, bruker oppgaven priser og serviceintervaller oppgitt direkte fra Telenors leverandør

Tabell 9 - Opex for FC. Priser pr. enhet

Opex	Frekvens i år	kost
Flaskeleie 50l	1	500
Flaskeleie 20l	1	500
FC Gen service	5	5454
Strøm - standby 55W	1	578
Påfyll 50l ståflaske	4	1306
Påfyll 20l ståflaske	1	1073

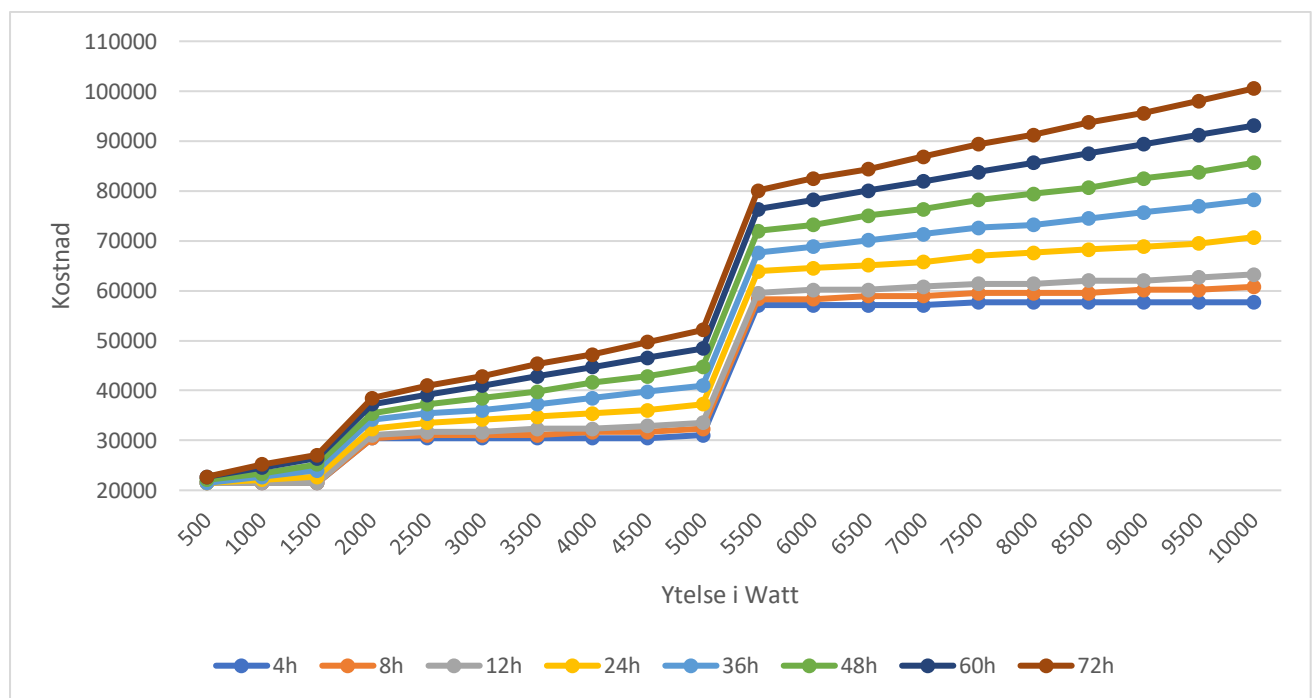
Tabell 9 viser en oversikt over driftskostnadene for brenselceller.

Telenor har besluttet at de ønsker å kjøpe en tjeneste for å leie gassflasker fremfor å eie disse.

Det er et krav at det skal være tre 20l flasker som stasjonen bruker når den utfører automatiske systemtester. Dette er fordi arbeidet med å skifte de små 20l flaskene lett kan gjøres av en person, slik at det på sikt vil være billigere å ha disse sammen med 50l flasker som vil bli brukt for mesteparten av energilagringen. Hvert 5. år må det utføres service på FC. Posten «strøm – standby 55W» er kostnaden for strømforbruk for brenselcellen for et år. En strømpris inkludert nettleie på 1,2kr/kWh er brukt i kostnadsberegningen. De to siste postene er estimater for forbruk av hydrogen.

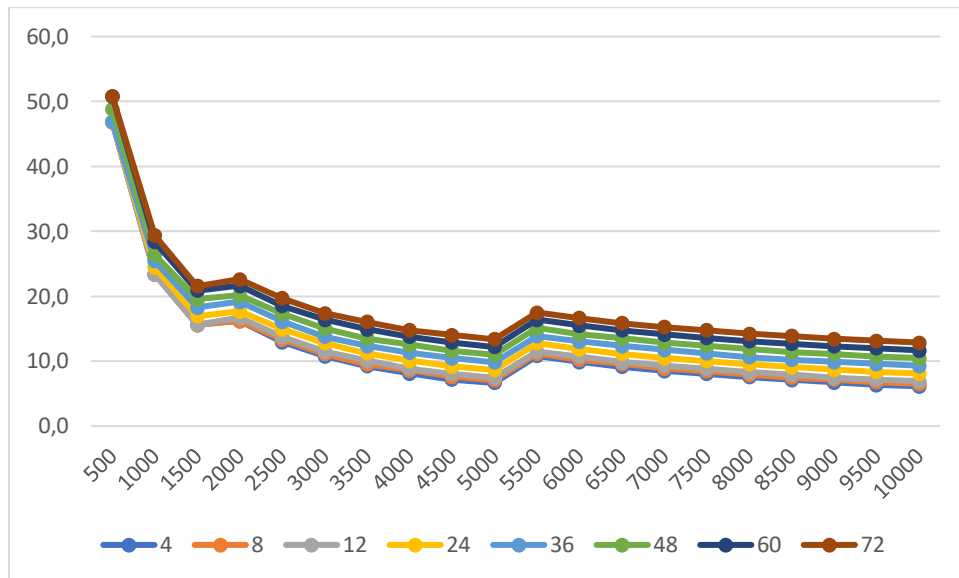
Resultater

Figur 11 viser totalkostnadene for FC. Grafen viser effekten investeringskostnaden av brenselcellen har på totalkostnaden. Dette sees av prisdifferansen mellom 1500W og 2000W, som viser overgangen fra brenselcelle på 1,7kW til brenselcelle på 5kW. Overgangen fra 5000W til 5500W viser overgangen fra én til to brenselceller på 5kW.



Figur 11 - Totale kostnader i priser pr. år for FC

Figur 12 Viser tydelig effekten av økte investeringer til brenselcellen, ved at kostnaden pr. watt går tydelig opp i overgangene mellom 1,7kW og 5kW brenselcelle og overgangen mellom én og to 5kW brenselceller.



Figur 12 - Totalkostnader pr. Watt, FC

	4h	8h	12h	24h	36h	48h	60h	72h
500W	23414	23414	23414	23414	23414	24403	25393	25393
1000W	23414	23414	23414	24403	25393	26382	28361	29350
1500W	23414	23414	23414	25393	27371	29350	31329	32318

Tabell 10 - Totalkostnader for FC, 500W, 1000W og 1500W

Tabell 10 viser kostnadene for FC ved effektbehov 500,1000, og 1500W. Fram til 12 timers gangtid er kostnadene de samme for både 500W,1000W og 1500W. Dette kommer av krav om minimum 3x20 liters-flasker på stasjonene. For last på 500W er det kun 7,8% prisøkning mellom 4h og 72h gangtid. For 10kW øker totalkostnaden med 52,3% ved en økning av gangtid fra 4 til 72 timer. Dette viser at totalkostnaden for en økning i gangtid er mer prisfølsom for høye effektbehov enn ved lave.

Tabell 11 - Antall gassflasker i optimal løsning for 72 timer gangtid

W	50l flaske	20l flaske
500	2	3
1000	6	3
1500	9	3
2000	9	3
2500	16	4
3000	20	3
3500	24	3
4000	27	3
4500	31	3
5000	35	3
5500	38	3
6000	42	3
6500	45	3
7000	49	3
7500	53	3
8000	56	3
8500	60	3
9000	63	3
9500	67	3
10000	71	3

Tabell 11 viser en oversikt over antall gassflasker som det er behov for ved 72 timers gangtid. Det store antallet gassflasker det er behov for ved lang gangtid fører til at driftskostnadene blir en stor andel av totalkostnadene. For en ytelse på 10kW utgjør flaskeleie og påfyll 66530kr av en totalkostnad på 128630kr. Dette fører til at driftskostnadene utgjør 54,6% av de totale kostnadene.

4.2.5. Samlet økonomisk vurdering

Dette kapittelet ser på hvilke teknologier som utgjør den optimale løsningen for hvert intervall i modellen for de to scenarioene som er undersøkt.

Case 1 – bygging av ny stasjon

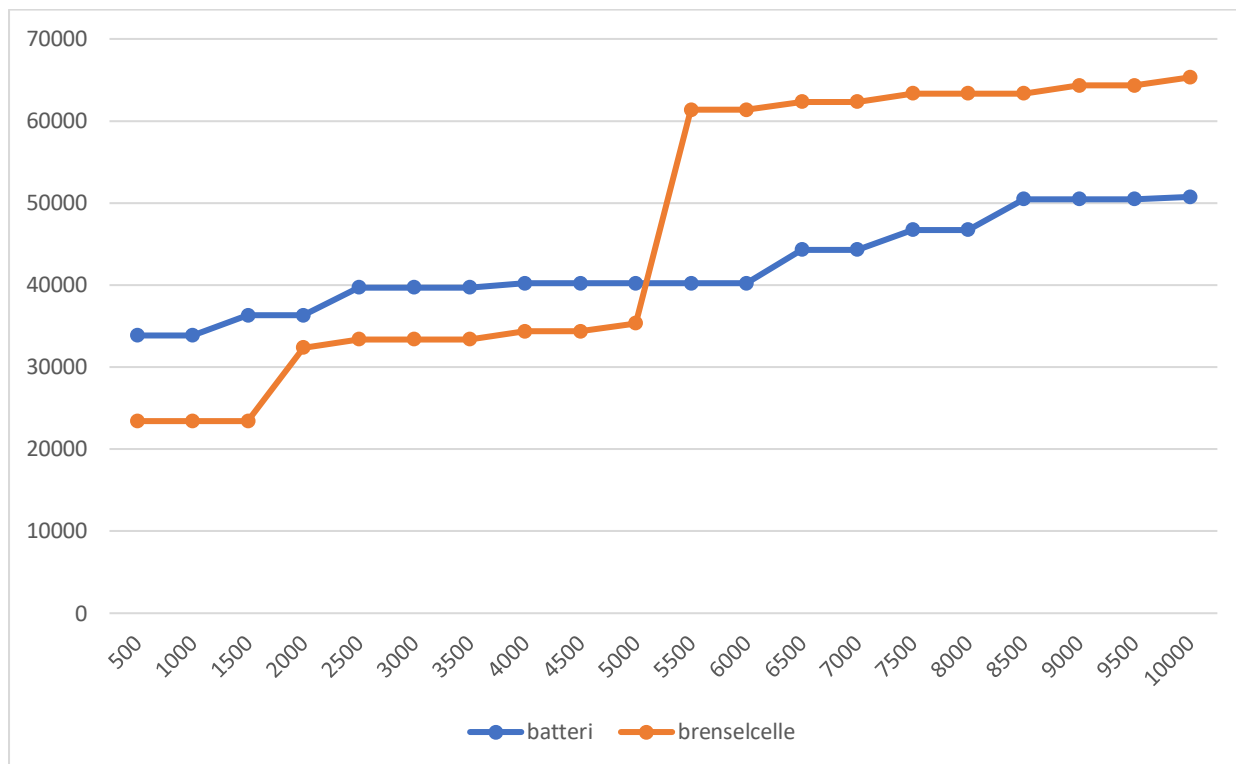
Resultatet for case 1 som inkluderer bygningskostnad for batterier er samlet i Tabell 12.

Tabell 12 - Oversikt over optimal teknologi i hvert intervall. AGG=Aggregat, BAT=batteri, FC=brenselcelle

	4	8	12	24	36	48	60	72
500	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC
1000	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC
1500	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC
2000	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC
2500	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC
3000	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC
3500	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC
4000	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC
4500	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC
5000	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC
5500	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	FC	AGG	AGG
6000	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT, FC	FC, AGG	AGG	AGG
6500	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT, FC	AGG	AGG	AGG
7000	BAT	BAT	BAT	BAT	FC	AGG	AGG	AGG
7500	BAT	BAT	BAT	BAT	FC	AGG	AGG	AGG
8000	BAT	BAT	BAT	BAT	FC, AGG	AGG	AGG	AGG
8500	BAT	BAT	BAT	BAT, FC	FC, AGG	AGG	AGG	AGG
9000	BAT	BAT	BAT	FC	AGG	AGG	AGG	AGG
9500	BAT	BAT	BAT	FC	AGG	AGG	AGG	AGG
10000	BAT	BAT	BAT	BAT, FC	AGG	AGG	AGG	AGG

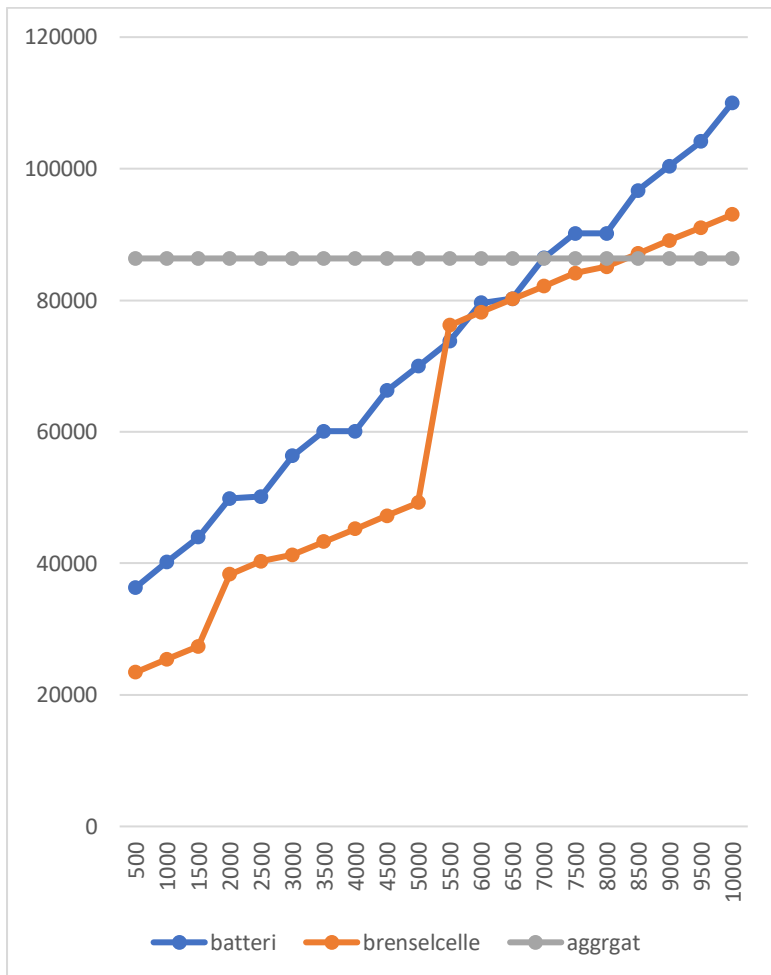
I denne casen er FC den optimale løsningen i alle intervallene fra 500W til 5000W for alle gangtider. Den store merkostnaden for den 2. brenselcellen fører til at FC kun er optimalt i få intervaller for effekter over 5000W. Trenden i dataene er at batterier er optimalt for gangtider til og med 12 timer, og aggregat er optimalt fra 48 timer og opp ved effektbehov over 5kW. For gangtider på 24 og 36 timer vil den optimale løsningen variere med effekt. Figur 13 viser den totale prisutviklingen for FC og batterier pr. år. FC er den optimale løsningen fram til 5000W overskrides. Prisøkningen for en ekstra brenselcelle er så stor at batteri er den optimale teknologien for de resterende intervallene. Aggregat er

ekskludert fra grafen siden den ikke er den optimale løsningen i noen av intervallene med en total kostnad på 72 675kr.



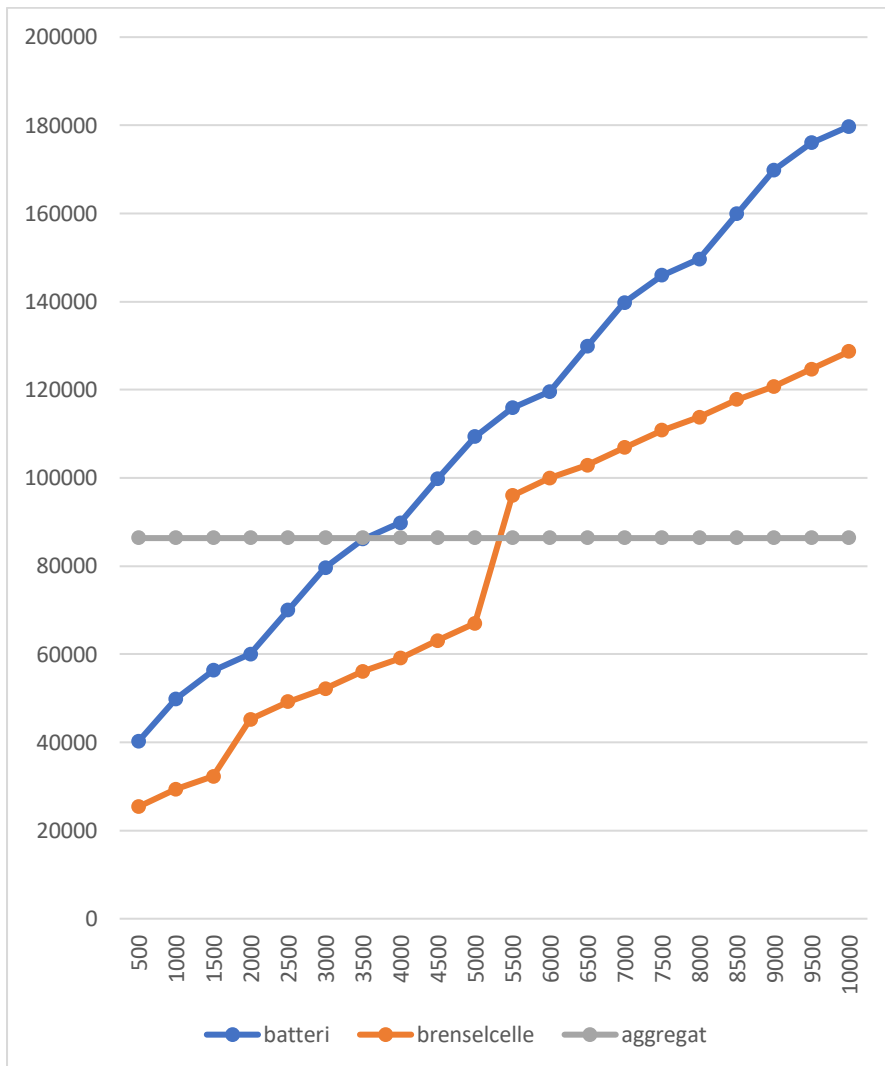
Figur 13 - Totale årlige kostnader for FC og batterier inkludert bygningskostnad, 8 timer gangtid

Figur 14 viser den optimale løsningen for 36 timers gangtid. Dette er den eneste gangtiden som inkluderer alle de tre teknologiene i den optimale løsningen. FC er optimalt til og med 5000W. totalkostnadene er forholdsvis like mellom teknologiene fra 5500W til 9000W. ved 9kW og opp er aggrgat er optimalt.



Figur 14 - Totale kostnader for alle teknologier, 36 timer gangtid

Figur 15 er typisk for prisutviklingen fra 48 timer og opp. FC er optimalt fram til 5500W og Aggregat er optimalt på laster over dette. Investeringskostnadene for batterier har blitt høye på grunn av stor last kombinert med lang gangtid krever svært mange batteristrenger for å ha tilstrekkelig kapasitet.



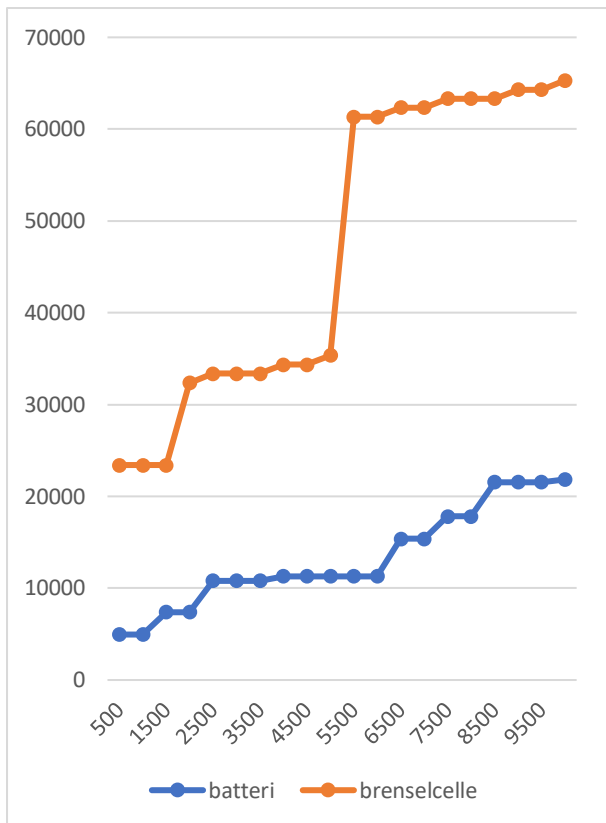
Figur 15 - Totale kostnader for alle teknologier, 72 timer gangtid

Case 2 – Oppgradering av eksisterende stasjon

I denne casen har batteriene en stor konkurransefordel fordi kostnader for etablering av batterirom ikke er nødvendig. Av Tabell 13 er det tydelig at batteri har utkonkurrert FC i alle unntatt et fåtall intervaller.

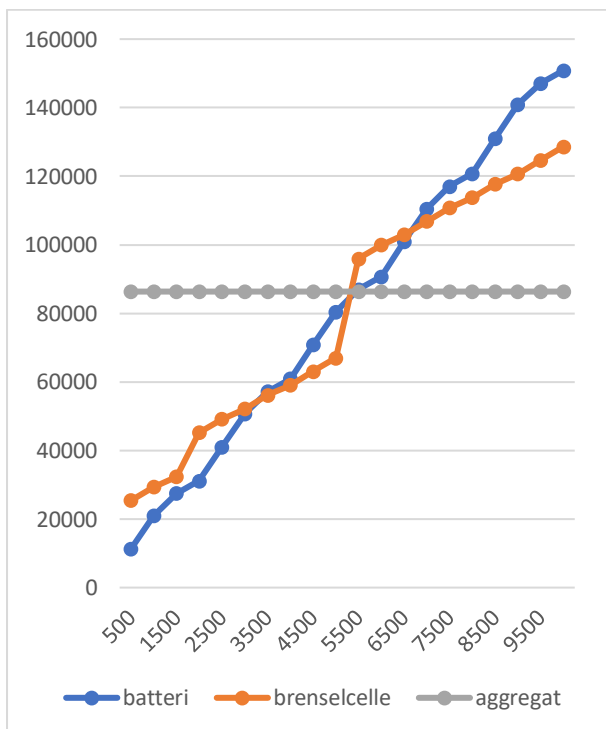
Tabell 13 - Oversikt over optimal teknologi i hvert intervall for case 2. AGG=Aggregat, BAT=batteri, FC=brenselcelle

	4	8	12	24	36	48	60	72
500	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT
1000	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT
1500	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT
2000	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT
2500	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT
3000	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT
3500	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT, FC
4000	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT, FC
4500	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	FC
5000	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	FC	FC
5500	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	AGG
6000	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	AGG
6500	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	AGG
7000	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	AGG	AGG
7500	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	AGG	AGG
8000	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	AGG	AGG
8500	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	AGG	AGG	AGG
9000	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	AGG	AGG	AGG
9500	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	AGG	AGG	AGG
10000	BAT	BAT	BAT	BAT	BAT	AGG	AGG	AGG



Figur 16 - totale kostnader pr år for FC og batteri case 2

Figur 16 viser at kostnadene for å investere i batterier er vesentlig lavere enn FC fordi investeringskostnaden er lav.



Figur 17 - Totale kostnader pr år case 2, 72 timer gangtid

For lange gangtider er det mye tettere konkurranse mellom FC og batteri. Dette sees i Figur 17. Dersom det hadde vært krav til gangtid som var høyere enn 72 timer ville FC kunne konkurrert med batteri. For høye laster er totalkostnadene for aggregat klart lavest.

4.3. Miljøeffekter

4.3.1. Batterier

(Rydh, 1999, s. 26) Viser til at utslippene knyttet til produksjonen av bly-batterier i stor grad avhenger av mengden resirkulert bly som benyttes i produksjonen av batteriene, og at det derfor varierer stort hvor store utslipp som er knyttet til batteriproduksjonen. Batteriene som benyttes til nødstrømsforsyning blir ladet av strøm levert gjennom strømmettet. Andel fornybar energi er derfor den samme som den norske kraft balansen. (Energidpartementet, 2014) viser at det er en svært liten andel av kraften, ca. 2%, som ikke kommer fra fornybare kilder. Batterier som benyttes til nødstrøm er i Norge regnet som farlig avfall og skal alltid sendes til resirkulering når de skal dekommisjoneres, slik at miljøpåvirkningen fra bly regnes som lav.

4.3.2. Aggregat

Dieselaggregat driftes med normal diesel som stammer fra oljeraffinering. Utslipp knyttet til produksjonen er derfor den samme som for utvinning av diesel.

Nødstrømsaggregat har også lokale utslipp. Både CO₂ og NO_x er gasser som avgis lokalt ved generering med dieselaggregat. I tillegg er det knyttet utslipp til transport av drivstoff til stasjonene.

Når forurensing vurderes er det også behov for å ta hensyn til støy.

Forurensingsforskriften §5-9 forteller at anleggseiere skal unngå at tiltaksgrensen for støy blir overskredet (forurensingsforskriften, 2020).

Nødstrømsaggregat avgir motorstøy i tillegg til viftestøy fra ventilasjonen og det er derfor fare for at støygrensene kan bli overskredet. Det er derfor viktig å vurdere støynivå ved installasjon av aggregat for stasjoner som er lokalisert nær annen bebyggelse. Det kan tenkes at det er mer hensiktsmessig å installere et dyrere batteri- eller brenselcelleanlegg der det er fare for å utsette boliger for støy.

4.3.3. Fuel cell

(Guerrero-Lemus & Martínez-Duart, 2013, kap. 5.4) forklarer at produksjonsutslippene for brenselceller varierer kraftig etter hvilken metode som benyttes til å produsere hydrogen. Hydrogen produsert med elektrolyse basert på vannkraft har tilnærmet ingen utslipp, mens elektrolyse basert på kullkraft har utslipp på 300kg CO₂/GJ.

Den vanligste formen for hydrogenproduksjon er gassreforming som det estimeres at 68% av verdens hydrogenproduksjon er basert på (energidepartementet, 2019, s.22). Det er derfor sannsynlig at hydrogenet som blir benyttet til basestasjonene vil stamme fra gassproduksjon. Det er mulig å kjøpe «grønt hydrogen» der selger lover av produksjonen av hydrogen er fra fornybare energikilder, men da til en økt kostnad.

FC har ikke lokale klimagassutslipp annet enn knyttet til transport av drivstoff til stasjonen.

4.4. Samlet vurdering av løsningene

Den samlede anbefalingen av nødstrømsløsning vil basere seg på en vurdering av ytelse, kostnader og miljøeffekter. Kostnadene vil veie tyngst i vurderingen ettersom alle de tre løsningene oppfyller krav til ytelse og miljøutslipp som er satt av NKOM og Telenor. Kostnadsvurderingen i den samlede anbefalingen legger størst vekt på kostnader ved bygging av en ny stasjon ettersom dette viser ytelsesforskjellen mellom teknologiene best.

De viktigste momentene for ytelse er samlet i Tabell 14. Av tabellen kommer det fram at diesellaggregat har utfordringer når det kommer til pålitelighet, servicebehov og miljøpåvirkning.

Den lave påliteligheten sett opp mot de to andre teknologiene vil veie tungt ved en anbefaling fordi det er kritisk at nødstrøms-anlegget fungerer når det oppstår utfall. FC stiller sterkt med svært godt med god pålitelighet, men det er lite erfaringer fra drift som gjør at det vil være noe usikkerhet rundt ytelsen til løsningen.

Batterier har en stor fordel ved at det ikke er behov for transport av drivstoff og den lange erfaringstiden gjør at det sjelden oppstår feil som fører til langvarig nedetid.

Utslipp knyttet til drift vil i realiteten være svært små for nødstrømsforsyning fordi driftstiden pr. år er svært kort. Den gjennomsnittlige strømkunden var uten strøm 2 timer og 46 minutter i løpet av 2018 (NVE, 2019, s.14). Utslipp fra driften vil derfor ikke vektlegges sterkt i totalvurderingen.

Totalt sett er anbefalingen å gå for den optimale økonomiske løsningen, bortsett fra der det er liten forskjell i kostnad mellom aggregat og de to andre teknologiene. Dette er på grunn av lave den påliteligheten til aggregat som fører til en dårligere leveranse til kundene i tillegg til kostnader til retting av feil.

Tabell 14 - sammenligning av nøkkelparametere

Faktor	Batterier	Brenselcelle	Dieselaggregat
Kostnader	Best ytelse ved middels gangtid og effekt.	Best ytelse ved lav effekt ved alle gangtider	Best ytelse ved høy effekt og lang gangtid
Servicebehov	Lavt servicebehov	Lavt servicebehov	Høyt behov for vedlikehold
Distribusjon av drivstoff	Lades med strøm fra nettet.	Hydrogenflasker – kan fraktes av mindre kjøretøy	Diesel. Må fraktes med tyngre kjøretøy
Miljøpåvirkning	Lav – bly fra batteriene blir resirkulert. Ingen støy under drift	Medium - hydrogenproduksjon har lavere utslipp enn diesel, lavt støynivå ved drift	Høy - diesel som drivstoff og støy ved drift.
Pålitelighet	Medium. høy grad av pålitelighet, men feil på batterier og likerettermoduler forekommer	Høy. Svært høy driftssikkerhet	Lav. Teknologien har den laveste påliteligheten. Kombinert med vanskelig feilretting utgjør dette at teknologien er minst pålitelig.
Erfaringstid	Svært lang erfaringstid gjør at det er god kjennskap til ytelsen.	Ny teknologi i det norske markedet. Kort erfaringstid gjør at det er mer usikkerhet rundt ytelse.	Svært lang erfaringstid gjør at det er god kjennskap til ytelsen.

5. Diskusjon og Konklusjon

5.1. Hovedresultater

Resultatene i oppgaven viser at av de undersøkte teknologiene er det kun brenselceller som er egnet til bruk i mobilstasjoner, som ikke allerede er tatt i bruk.

Brenselceller er egnet på grunn av modulær oppbygning som gjør at gangtid bestemmes fra 4-72 timer ved endring i antall hydrogenflasker. Levert effekt kan tilpasses ved størrelse på brenselcellen. Påliteligheten har vist seg å være svært god, resultater fra pilotprosjekt og erfaringer fra det danske nødnett viser at påliteligheten til FC er høyere enn både batteri og aggregat.

Den økonomiske analysen viser at FC er en konkurransedyktig teknologi som bør vurderes når nødstrømsanlegg til nye basestasjoner skal bygges. FC er spesielt konkurransedyktig på stasjoner som har et forbruk på 5000W eller lavere. Ved stasjoner som har eksisterende batterirom, vil det ikke være lønnsomt å bytte fra batteri til FC.

Resultatet fra den økonomiske analysen av case 1 gir at FC er optimalt i 53,1% av intervallene, batteri 23,1%, aggregat 19,4% og ved 4,4% av tilfellene der det er to optimale løsninger. FC er optimalt for laster på 5000W og ned for alle gangtider. Batteri er optimalt for last på 5500W og opp for 4-24 timer. Aggregat er optimalt for last på 5500W og opp for 36-72 timer.

For case 2 viser analysen at FC er optimalt i 1,9% av intervallene, batteri 83,7%, aggregat 13,1% og 1,3% av intervallene der det er to optimale løsninger. I dette scenarioet er batteri den optimale løsningen for alle intervaller unntatt ved gangtid fra 48 timer og opp der aggregat er den optimale løsningen bortsett fra 3 intervaller der FC er optimalt. Dette viser at de store kostnadene for bygningstilpasning er avgjørende for hvilken teknologi som vil være optimal.

Der hvor totalkostnadene for aggregat er nær kostnadene for batteri eller FC, anbefales det å velge FC eller batteri, ettersom den teknoøkonomiske gir at batteri og FC har høyere driftssikkerhet.

Teleoperatørens ønske om en 100% fornybar strømforsyning kan gjøre at de er villige til å velge en dyrere løsning dersom den er fornybar. FC kan sees på som fornybar dersom det

sørger for at hydrogen som kjøpes inn er produsert med fornybar kraft. Dette kan gjøres dersom det kjøpes «grønt hydrogen». «Grønt hydrogen» er tilgjengelig på det norske markedet, men prisen er høyere enn for hydrogen som er produsert fra kull, olje eller naturgass. Det kan tenkes at Teleoperatørene er villige til å betale merkostnadene fordi stasjonene driftes kun kort tid på nødstrømsanlegg pr. år, slik at det trolig vil føre til en liten økning i total kostnadene å velge «grønt hydrogen».

Miljøpåvirkningen til nødstrømsforsyningen anses for å være liten fordi stasjonene kun driftes få timer i løpet av et år på nødkraft. Det er derfor konkludert med at miljøpåvirkning ikke er en tilstrekkelig stor faktor til å endre anbefaling av teknologier bort fra den økonomisk optimale løsningen.

5.2. Sammenligning av funn i annen forskning.

Resultatene i denne oppgaven samsvarer med resultatet Nødnett kommer fram til i sin rapport (Nødkommunikasjon, 2012). Rapporten konkluderer med at batterier er beste løsning for gangtid opptil ca. 24 timer fordi løsningen krever lite service og krever lite plass. Nødnetts analyse har sett på laster på 0,8kW, 1,5kW og 2,1kW. Slik at resultatene kun er sammenlignbare ved lav last. Det kommer ikke fram av rapporten hvilke bygningstekniske tiltak som er inkludert i den økonomiske analysen.

Nødnett konkluderer med brenselcelle er den beste løsningen for gangtider fra 48 timer og opp, på grunn av god pålitelighet og at FC anses som mer miljøvennlig enn aggregat.

Konklusjonen i oppgaven om at FC oppfyller krav til bruk på mobilstasjoner samsvarer med Nødnetts funn.

5.3. Usikkerhet i forutsetninger

5.3.1. Økonomiske forutsetninger

Kostnadene som er oppgitt som estimater i oppgaven vil være en kilde til usikkerhet. Spesielt estimatet til investeringskostnader for bygningstilpasning er det knyttet en vesentlig usikkerhet til fordi kostnaden varierer ut fra tilstanden til eksisterende bygningsmasse og hvor stasjonen er lokalisert. Funnene i den økonomiske analysen understreker dette ved at den optimale løsningen ble endret når kostnaden for bygningsutbedringer ble endret.

Resultatene påvirkes av valg av rentefot som her er satt til 5% med basis i NVEs rentefot.

I den økonomiske modellen antas det at alle komponenter har samme levetid som den tilhørende teknologien. Det kan eksempelvis være at rack til batterier har noe lenger levetid enn batteriene, slik at de totale kostnadene ved en reinvestering i samme type nødstrømsforsyning kan tenkes å være lavere enn det modellen gjenspeiler.

5.3.2. Usikkerhet knyttet til teknologiene

FC er en ny teknologi for norske mobiloperatører. Det er derfor ikke det samme erfaringsgrunnlaget som for batterier og FC der det ligger mange tiår med erfaringsdata til grunn.

Fordi FC er en ny teknologi på markedet vil det være sannsynlig at kostnaden for å kjøpe et anlegg vil gå ned, dersom teknologien får en betydelig markedsandel i det norske mobilnettet.

Den samme utviklingen kan det tenkes at kostnadene for selve brenselcellen vil ha. Dersom bilprodusenter fortsetter å satse på PEM-brenselceller i sine kjøretøy, er det sannsynlig at det vil bli en spillover-effekt til telesektoren både med tanke på teknologiens ytelse og kostnad. Dersom det satses på hydrogen i transportsektoren vil det føre til at hydrogengass vil bli mer tilgjengelig på markedet, som trolig vil føre reduserte innkjøpspriser.

5.4. Videre forskning

Ved den økonomiske analysen av FC kommer det fram at det er store kostnader knyttet til leie av flasker. Ved største last og gangtid er det behov for totalt 74 gassflasker med en årlig leiekostnad på 500kr pr. flaske. Det bør derfor undersøkes om det er mulig at teleoperatøren eier flaskene selv og kun betaler en ekstern aktør for påfylling av hydrogen. Det bør også undersøkes om det er gjennomførbart å bytte 74 50l-flasker med manuelt arbeid, ettersom flaskene er tunge vil det være høy fysisk belastning dersom dette skal gjøres uten hjelpemidler. Denne utfordringen kan reduseres ved at trykket på 50l-flasker økes fra 200bar til 300bar, som fører til at det vil være 16kWh pr flaske framfor 10kWh. I eksempelet der det i dag er behov for 74 flasker med 200bar vil det være behov for 47 flasker dersom trykket i flaskene økes til 300 bar. 50l-flasker med 300bar er ikke tilgjengelig fra Telenors leverandør pr. mai, 2020. Dersom dette blir tilgjengelig vil det utgjøre en betydelig kostnadsreduksjon for FC ettersom det er behov for å leie færre flasker og det vil ikke være behov for like mange regulatorer. Den økonomiske modellen gir at endringen vil føre til en prisreduksjon på 20,8% ved krav på 10kW og 72 timer gangtid.

For å få det fulle bildet av kostnadene gjennom levetiden bør det utføres en analyse av de eksisterende nødstrømsforsyningene i nettet for å finne ut hva kostnadene for feilretting er for hver teknologi gjennom levetiden. Ved å inkludere denne kostnaden kan den økonomiske modellen også ta høyde for kostnader til utbedring av feil. Det er sannsynlig at dette kan føre til en endring av den optimale økonomiske løsningen.

6. Kilder

6.1.litteraturliste

- Ahluwalia, R. K. & Wang, X. (2008). Fuel cell systems for transportation: Status and trends. *Journal of Power Sources*, 177 (1): 167-176. doi: 10.1016/j.jpowsour.2007.10.026.
- Ballard. (2020). *Fuel Cell Backup Power*. Ballards website.
- Dantherm. (u.å.). *DATA SHEET: BACK UP POWER - Dantherm Battery eXtender – DBX5000*.
- Drazga, B. (2012). *Utility energy storage : profiles batteries, compressed air storage, flywheels, hydrogen, superconducting magnetic energy storage, thermal energy storage, ultracapacitors, and vehicle - to - grid*. Phoenix, Ariz.: Red Mountain Insights.
- Ekomloven. (2020). *Lov om elektronisk kommunikasjon*. Lovdata (lest 24.04).
- energidepartementet, K.-o. m. o. O.-o. (2019). *Produksjon og bruk av hydrogen i Norge*. Tilgjengelig fra:
<https://www.regjeringen.no/contentassets/0762c0682ad04e6abd66a9555e7468df/hydrogen-i-norge---synteserapport.pdf> (lest 14.05).
- Energidepartementet, O.-o. (2014). *Fornybar energiproduksjon i Norge*: Regjeringen.no. Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/no/tema/energi/fornybar-energi/fornybar-energi-produksjon-i-norge/id2343462/> (lest 20.04).
- ETSI. (2019). *ETSI EN 300 132-2 V2.6.1*: ETSI (lest 15,05).
- forurensingsforskriften. (2020). *Forskrift om begrensning av forurensning*. Tilgjengelig fra: https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2004-06-01-931/KAPITTEL_2-1-2#%C2%A75-4.
- GSMA. (2019). *2019 Mobile Industry Impact Report: Sustainable Development Goals*.
- Guerrero-Lemus, R. & Martínez-Duart, J. M. (2013). *Hydrogen Production*. 2013 utg. Lecture Notes in Energy, b. 3. London: London: Springer London.
- NVE. (2004). *Leveringskvalitet i kraftsystemet* Tilgjengelig fra:
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwidiaTzr73pAhVHPJoKHRMVC_cQFjAAegQIBRAB&url=http%3A%2F%2Fpublikasjoner.nve.no%2Fdokument%2F2004%2Fdokument2004_03.pdf&usq=AOvVaw0DIMMkGfR4aYDNXgsEu0M1 (lest 18.05).
- NVE. (2019). *Avbrottsstatistikk 2018*. I: Eggum, E. (red.): NVE.
- NVE. (2020). *Referanserenten*. Tilgjengelig fra:
<https://www.nve.no/reguleringsmyndigheten/okonomisk-regulering-av-nettselskap/om-den-okonomiske-reguleringen/referanserenten/> (lest 27.04).
- Nødkommunikasjon, D. f. (2012). *Reservestrømbereidskap i Nødnett* Nødnett. Tilgjengelig fra:
https://www.nodnett.no/globalassets/dokumenter/rapporter/2012_12_20-rapport---reservestromberedskap-i-nodnett.pdf (lest 15.05).
- Popel', O. & Tarasenko, A. (2012). The comparative analysis of systems of long-term electric power storage intended for sources of back-up and emergency power supply, as well as for power plants using renewable energy sources. *Thermal Engineering*, 59 (11): 866-873. doi: 10.1134/S0040601512110122.
- Rashid Muhammad, H. (2011). *Uninterruptible Power Supplies*. 3rd Edition utg.: Elsevier.
- Rydh, C. J. (1999). Environmental assessment of vanadium redox and lead-acid batteries for stationary energy storage. *Journal of Power Sources*, 80 (1): 21-29. doi: 10.1016/S0378-7753(98)00249-3.
- Telenor. (2019). *Operasjon dekning*: Telenor. Tilgjengelig fra: <https://www.telenor.no/om/teknologi-norge/operasjon.jsp> (lest 27.04).
- teletilsynet, P.-o. (2014). Minstekrav til reservestrømkapasitet i landmobile nett.
- Telia. (2019). *Endelig dekning ved Trollstigen: Telia bygger infrastruktur basert på grønn energi*. Tilgjengelig fra: <http://presse.telia.no/pressreleases/endelig-dekning-ved-trollstigen-telia-bygger-infrastruktur-basert-paa-groenn-energi-2885710> (lest 20.04).

Wang, Y., Chen, K. S., Mishler, J., Cho, S. C. & Adroher, X. C. (2011). A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology, applications, and needs on fundamental research. *Applied Energy*, 88 (4): 981-1007. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.09.030>.



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway