

# Prosjektrapport

Ekspertter i team

Punktlig og effektiv jernbane

Gruppe 3

## Forord

Denne prosjektrapporten er skrevet som en del av faget Eksperter i team (EiT) ved NTNU våren 2015. Eksperter i team er et obligatorisk fag i åttende semester ved NTNU, og er et yrkesforberedende emne hvor hensikten er å lære studentene å samarbeide gjennom å anvende sin fagkunnskap i et tverrfaglig prosjektarbeid (ntnu.no, 09.02.15). Studentene som har vært med på å forme og skrive denne rapporten er Jennie Cecilie Karlsen, Jon-Brede Rykkje Dieseth, Magnus Ek Knutsen, Sondre L. Helgesen og Trond Espset.

Gruppen har gjennom hele vårsemesteret 2015 jobbet med et egendefinert prosjekt innenfor temaet *Punktlig og effektiv jernbane*, som beskrives i denne rapporten. Prosjektrapporten gir en inngående beskrivelse av problemstilling og løsning på problemstillingen.

Vi ønsker til slutt å rette en stor takk til Jernbaneverket, og spesielt Johan Anton Wikander, for å ha tatt seg tid til å bidra med detaljert informasjon om Nordlandsbanen og alternative energikilder for tog. Videre ønsker vi å takke landsbyleder Christoffer Østvik for god veiledning og konstruktive tilbakemeldinger underveis.

## Innholdsfortegnelse

Forord.....	1
Figurliste .....	3
Tabelliste.....	3
1 Sammendrag .....	4
2 Introduksjon.....	5
3 Dagens situasjon på Nordlandsbanen .....	6
3.1 Innledning.....	6
3.2 Analyse av strekningen .....	7
3.2.1 Lengdeprofil av Nordlandsbanen.....	7
3.2.2 Kritiske punkt.....	7
3.3 Sikkerhet.....	8
3.4 Dagens energikilde – Diesel.....	8
4 Alternative energikilder.....	9
4.1 Biodiesel.....	9
4.2 Naturgass/LNG.....	9
4.3 Hydrogen.....	11
4.4 Elektrifisering.....	12
4.5 Batteri.....	14
5 Hybridløsninger.....	16
5.1 Innledning.....	16
5.2 Elektrifisering & Diesel .....	16
5.3 Elektrifisering & Biodiesel/LNG .....	16
5.4 Elektrifisering & Batteri.....	16
5.5 Batteri & Diesel/Biodiesel/LNG/Hydrogen.....	17
5.6 Hydrogen & batteri.....	17
6 Valg av energikilder for videre studie .....	17
7 Personikkerhet.....	18
7.1 Preliminary Hazard Analysis(PHA).....	18
7.2 Risikomatriser .....	18
7.3 Akseptkriterier for risiko .....	18
7.4 Akseptkriterier for risiko på Nordlandsbanen.....	20
7.5 Personikkerhet ved de alternative energikildene .....	21

7.5.1	Naturgass/LNG .....	21
7.5.2	Hydrogen.....	23
7.5.3	Elektrifisering .....	25
7.5.4	Batteri.....	27
7.6	Evaluering personsikkerhet .....	29
8	Vedlikehold og driftssikkerhet .....	31
8.1	Driftssikkerhet ved dagens løsning .....	32
8.2	Driftssikkerhet for de ulike energikildene .....	33
8.2.1	LNG .....	33
8.2.2	Hydrogen.....	34
8.2.3	Elektrisitet.....	35
8.2.4	Batteridrift.....	36
8.3	Konklusjon for driftssikkerhet .....	37
9	Diskusjon.....	38
10	Konklusjon.....	41
11	Forslag til videre arbeid .....	42
12	Referanser .....	43

## Figurliste

Figur 1	Lengdeprofil av Nordlandsbanen fra Trondheim S til endestasjonen i Bodø .....	7
Figur 2	Thermal runaway.....	27
Figur 3	Sentrale begreper innen driftssikkerhet.....	31

## Tabelliste

Tabell 1:	PHA for diesel .....	20
Tabell 2:	Risikomatrise for diesel .....	21
Tabell 3:	PHA for naturgass .....	22
Tabell 4:	Risikomatrise for naturgass .....	23
Tabell 5:	PHA for hydrogen .....	24
Tabell 6:	Risikomatrise for hydrogen .....	25
Tabell 7:	PHA for elektrifisering .....	26
Tabell 8:	Risikomatrise for elektrifisering.....	26
Tabell 9:	PHA for batteri .....	28
Tabell 10:	Risikomatrise for batteri .....	29
Tabell 11:	IRPA-verdi for de ulike energikildene .....	30

## 1 Sammendrag

Rapporten ser på ulike alternative energikilder med fokus på drifts- og personsikkerhet på Nordlandsbanen. Dagens løsning med diesel, sammen med biodiesel og elektrifisering av hele strekningen, ser vi på som uaktuelle løsninger for fremtiden, grunnet miljøkonsekvenser og store kostnader. Vi mener LNG, batteri og hydrogen er energikildene for fremtiden på Nordlandsbanen, særlig med tanke på at man i stor grad kan benytte dagens infrastruktur. En hybridløsning mellom LNG og batteri, i tillegg til at man benytter pantograf på strekningen Trondheim-Steinkjer, kan være en løsning frem til teknologien knyttet til hydrogendrift er bedre utprøvd og mindre kostbar. Dette støttes også av vurderingene rundt person- og driftssikkerheten. Det viser seg at person- og driftssikkerheten er minst like god som dagens løsning, hvis ikke bedre. Dette er innenfor GAMAB-prinsippet fastsatt av jernbaneverkets standarder for vedlikehold, EN 50126.

Det videre arbeidet bør fokuseres rundt infrastrukturen som skal til for at LNG skal kunne bli en fullgod erstatning for diesel-elektrisk drift, og hvordan kombinasjonen av LNG og batteri kan benyttes på best mulig måte. Videre trengs det mer kunnskap rundt bruk av hydrogen som drivstoff i tyngre maskineri. Etter hvert som teknologien utvikles og blir billigere, bør det utredes hvordan denne typen teknologi optimalt kan benyttes i tog og hvordan infrastrukturen bør legges opp for at hydrogen skal bli en effektiv energikilde i fremtiden.

Når det kommer til samfunnsnyttene, vil overgangen til foreslåtte energikilder påvirke miljøet og kostnadene positivt. Utslippene vil bli redusert drastisk, i tillegg til at kostnadene knyttet til drift og vedlikehold vil bli lavere. Det vil også være lavere risiko for ulykker, da de foreslåtte energikildene er sikrere enn dagens løsning. I tillegg vil reisetiden på strekningen reduseres.

## 2 Introduksjon

Denne rapporten er utarbeidet av fem studenter fra NTNU i faget TBA4853 Ekspert i team - Punktlig og effektiv jernbane. De fem studentene studerer alle ved NTNU Gløshaugen, og gruppen består av personer med fagbakgrunn fra industriell økonomi og teknologiledelse med fordypning innen elkraft, energi- og prosesssteknikk, RAMS, vei og anlegg, og konstruksjonsteknikk.

Problemstillingen ble valgt av gruppen i fellesskap, og lyder som følger:

*“Alternative energikilder på Nordlandsbanen, med fokus på person- og driftssikkerhet.”*

Vi ønsker med andre ord, med denne rapporten, å se på alternative energikilder på Nordlandsbanen, ved å legge vekt på fordeler og ulemper ved de ulike energikildene, samt driftsforhold og sikkerhet. Dette er en problemstilling som er forankret både i landsbyen sitt tema og studentene sin tverrfaglige kompetanse. Problemstillingen tar tak i landsbytemaet ved at den ser på alternative energikilder i lys av teknologi, og person- og driftssikkerhet. Studentenes tverrfaglige kompetanse benyttes i den forstand at kunnskap innenfor vei og anlegg, og konstruksjon benyttes til å se på dagens situasjon og analyse av strekningen. Energi- og prosesssteknikk, og elkraft benyttes til å se på de alternative energikildene, mens RAMS benyttes til å se på person- og driftssikkerhet ved de aktuelle løsningene. Det at alle fikk anvende sin faglige ekspertise var hovedgrunnen til at denne problemstillingen ble valgt.

Temaet problemstillingen er knyttet til er teknisk, og derfor er metoden som er anvendt for å innhente informasjon hovedsakelig rapporter, fagtidsskrifter og lærebøker. I tillegg er presentasjoner fra Jernbaneverket holdt under seminar på Stjørdal 21.01.15, og intervjuer med Johan Anton Wikander benyttet i svært stor grad. Intervjuer var nødvendig å bruke der offentlig tilgjengelig informasjon ikke var tilstrekkelig, og ikke dekket spesifikke, jernbanetekniske spørsmål.

Denne rapporten er delt inn i fire deler. I den første delen presenteres de alternative energikildene vi har sett på, samt dagens løsning - diesel. De ulike energikildene blir drøftet rundt de tre punktene; teknologi, gjennomførbarhet, miljø og økonomi. I den andre delen blir de aktuelle energikildene trukket frem, og mulige hybridløsninger diskutert. I tredje del presenteres teori knyttet til person- og driftssikkerhet, før denne teorien i fjerde del blir anvendt på de aktuelle energikildene. Avslutningsvis blir det basert på analysen gitt forslag til videre arbeid, og hvordan dette arbeidet bør gjennomføres.

## 3 Dagens situasjon på Nordlandsbanen

### 3.1 Innledning

Nordlandsbanen er den lengste av hovedstrekningene på den norske jernbanen. Den strekker seg 726 kilometer fra Trondheim i sør til Bodø i nord. Banen går gjennom krevende terreng og skiftende klima fra innlandsbygder, kyststrøk og skogsområder til høyfjellsterreng (Jernbaneverket, 2015).

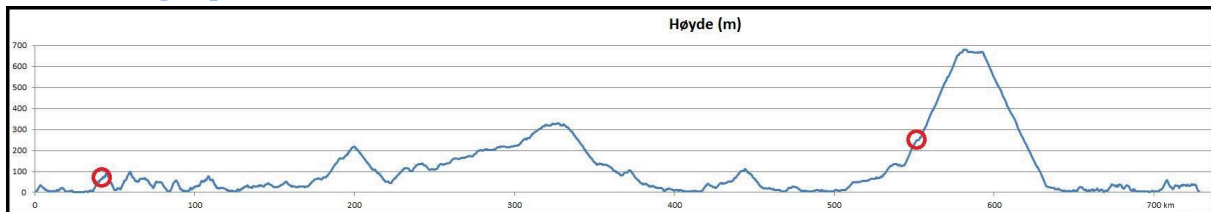
Nordlandsbanens historie strekker seg helt tilbake til 1872, da de første tankene om jernbaneforbindelse til Nordland ble framsatt av Ole Tobias Olsen, en mann som kan ses på som Nordlandsbanens far. Nordlandsbanen var ikke ferdig utbygd til Bodø før i 1962, da arbeidet var preget av etappevis utbygging på grunn av lange diskusjoner om trasévalg. Det høye utbyggingstempoet under andre verdenskrig gikk på bekostning av kvaliteten på traseen. Siden vedlikeholdet ikke var prioritert, ble kvaliteten på banen ytterligere svekket (NSB Bane, 1994).

Nordlandsbanen er en av få ikke-elektrifiserte strekninger i jernbanenettet i Norge, og dagens bane har begrensninger knyttet til reisetid. I dag bruker toget rundt 10 timer mellom Trondheim og Bodø på grunn av strekninger med svært lav hastighet grunnet sikkerhetsmessig aspekter, og begrenset trekraft hos diesellokene (NSB, 2015). Dette gjør at strekningen Trondheim-Bodø blir en flaskehals for optimal trafikkflyt og materialutnyttelse på strekningen Oslo-Bodø (NSB Bane, 1994). Denne oppgaven har derfor til hensikt å adressere hvordan alternative energikilder kan benyttes på Nordlandsbanen, sett i lys av person- og driftssikkerhet.

På Nordlandsbanen er det enkeltspor, noe som skaper problemer når det kjører tog i begge retninger. For å forbedre effektiviteten har man bygget kryssingsspor, men på grunn av terrenget på Nordlandsbanen er lengden på disse kryssingssporene begrenset. Dette er en begrensende faktor når man ser på hvilke alternative energikilder som vil være mulig å benytte.

## 3.2 Analyse av strekningen

### 3.2.1 Lengdeprofil av Nordlandsbanen



Figur 1 Lengdeprofil av Nordlandsbanen fra Trondheim S til endestasjonen i Bodø

### 3.2.2 Kritiske punkt

En jernbanestrekning bør ikke ha en stigning på mer enn 1,5%. En ytterligere økning av stigningen vil betraktelig øke behovet for større trekraft for det rullende materiell. Derfor er det ønskelig at en strekning med blandingstrafikk, både person- og godstog, skal ha en maks stigning på mellom 1,2 og 1,5%. Optimalt sett bør stigningen være mindre 1,0% for godstog (Kassa, 2014), med tanke på deres vekt og framføringen av de. Bliir togene for tunge i forhold til stigningen vil drivhjulene spinne. Til sammenligning kan høyhastighetstog kjøre opp stigninger rundt 4,0%.

Gjennomsnittlig stigning for Nordlandsbanen fra Trondheim til Bodø er på 0,78%, og det bratteste punktet er på 2,05%. Dette punktet er mellom Skavtal og Langstein, etter rundt 44 km, som vist i Figur 1.

En kritisk strekning er distansen mellom Dunderland og Bolna stasjon på veien opp mot Saltfjellet. Distansen er på rundt 15 kilometer, med en stigning på 260 meter. Det gir en gjennomsnittlig stigning på 1,71%, som illustrert ved rundt 560km i Figur 1. Strekket har få og slake kurver som gjør at lite krefter går vekk i kurvemotstand og togene kan holde en fart på om lag 90 km/t. Denne strekningen reduserer ikke effektiviteten til dagens tog, men er avgjørende for kravet til trekraften hos lokene til de alternative energikilder.

Totalt har Nordlandsbanen 154 tunneler på til sammen 60km som er bygd uten tanke på elektrifisering, som vil si at tunnelene har et minimumstverrsnitt som ikke rommer mer enn det rullende materiellet som går der i dag (NSB, 2015).

På Saltfjellet er Nordlandsbanen på sitt høyeste punkt, ca. 700 m.o.h. Dette er et strekk på banen som har harde værpåkjenninger. Jernbaneverket har utbedret deler av strekket for 40 mill. ved å heve sporet, og gravd grøft på sidene for å endre hvordan snøen legger seg. Dette ble gjort for å hindre at sporet snør igjen. Data fra værstasjonen ved Lønsdal stasjon ved 520 m.o.h. viser for 2014 at en har hatt temperaturer ned til  $-23^{\circ}\text{C}$ , vindhastighet på 15 m/s og vindkast opp mot 40 m/s (Meteorologisk institutt, 2015). Dette er ikke data fra toppen av Saltfjellet, men været vil være klart hardere på toppen. Naturkreftene som er i sving utsetter alle byggverk og infrastruktur for store påkjenninger.



### 3.3 Sikkerhet

Jernbaneverket har en egen sikkerhetsstyring for organisasjonen som setter føringer for drift, vedlikehold og utbygging, og brukes for å unngå skader på mennesker, miljø og materielle verdier (Jernbaneverket, 2013). Systemet inneholder skriftlig dokumentasjon for sikkerhetspolitikk, sikkerhetsmål, risikostyring, risikovurdering, ansvar og myndighet, kompetansestyling, leverandørstyring, rapportering, oppfølging og beredskap (Jernbaneverket).

Jernbaneverkets sikkerhetspolitikk baserer seg på nullvisjonen om ingen drepte eller varig skadde, og legges til grunn ved planlegging, organisering og gjennomføring av alle aktiviteter i selskapet (Jernbaneverket, 2014). De ønsker å kartlegge, fjerne og utbedre risikopunkt som kan lede til ulykker og uhell. Dette arbeidet er også koordinert med de andre aktørene som benytter seg av jernbanenettet.

### 3.4 Dagens energikilde – Diesel

#### Teknologi

Diesel er en vanlig energikilde for tog, og er den som blir brukt ved Nordlandsbanen i dag. Diesellok har vært brukt i Norge siden 1920-tallet og er derfor en utprøvd og driftssikker energikilde for tog. I nyere tid har dieselmotoren blitt brukt som ett aggregat for elektriske motorer for å optimalisere energioverføringen til hjulene. Dagens bane har en begrensning knyttet til lang reisetid pga. blant annet trekraften hos diesellok (NSB bane, 1994). Lokene som brukes på Nordlandsbanen i dag gir en trekraft på ca. 3200 kW (Thomassen, Møller-Holst, & Midtun, 2014). Denne begrensningen kommer spesielt fram ved akselerasjon. Her bruker diesellok mer energi og tid til å komme opp i hastighet, enn for eksempel elektriske lok. En fordel ved bruk av diesellok er at de kan brukes på alle baner. Det eneste som kreves av infrastruktur er fyllestasjoner, og dette er allerede godt utbygd.

#### Gjennomførbarhet

Dagens løsning er godt utprøvd og har vist seg som en god og sikker løsning.

#### Miljø og økonomi

Utslipp fra diesel er allerede et problem i bilparken, da utslippene fra diesel inneholder en del NO<sub>x</sub>- og CO<sub>2</sub>-gasser som forurenser lokalt og globalt. Dette kan medføre skader spesielt i byene hvor det også er mange andre fremkomstmidler som går på diesel. Det er også en fare for forurensning til grunnen som følge av søl ved fylling eller lekkasjer. Da diesel er dagens løsning, vil det ikke være nødvendig å bygge ny infrastruktur og dermed ikke innebærer investeringskostnader.

#### Fordeler og utfordringer

Fordeler	<ul style="list-style-type: none"><li>• Ingen investeringskostnader</li><li>• God tilgjengelighet på drivstoff</li><li>• Mye utprøvd og fungerer godt</li></ul>
Utfordringer	<ul style="list-style-type: none"><li>• Lokale og globale klimautslipp</li><li>• Reisetid</li></ul>

## 4 Alternative energikilder

### 4.1 Biodiesel

#### Teknologi

Biodiesel produseres fra raps, ryps eller brukt matolje. Dette produktet blandes med vanlig diesel i forskjellige konsentrasjoner og fungerer på samme måte som vanlig diesel. Det kreves kun mindre tekniske modifiseringer på en vanlig dieselmotor for å kunne ta i bruk biodiesel. Det er gjort flere forsøk på biodiesel i tog og resultatene er at de fungerer på lik linje med vanlige diesellok, med unntak av at biodiesel gir 8-10% reduksjon av motorkraft og et høyere drivstofforbruk. Dette vil kunne by på utfordringer for de kritiske strekningene diskutert i 3.2.2.

#### Gjennomførbarhet

Produksjon av biodiesel krever store jordbruksarealer. I Norge har vi begrenset med tilgang på jordbruksarealer sammenlignet med andre land. Det kan derfor være nødvendig å importere biodiesel for å opprettholde tilgangen.

#### Miljø og økonomi

Biodiesel kan gi reduksjon i utslipp av drivhusgasser på opptil 80% sammenlignet med vanlig diesel (UIC, 2007). Det vil også redusere partikkelutslippene, men de lokale utslippene av NO<sub>x</sub> vil øke (European Biofuels, 2015). Investeringskostnadene vil ikke være store ved innføring av biodiesel. Det kreves kun små investeringer knyttet motoren, men infrastrukturen vil kunne forbli som i dag. Når det kommer til økonomi, er biodiesel dyrere enn vanlig diesel.

#### Fordeler og utfordringer

Fordeler	<ul style="list-style-type: none"><li>• Lave investeringskostnader</li><li>• Mindre globale klimautslipp</li></ul>
Utfordringer	<ul style="list-style-type: none"><li>• Lokale klimautslipp, NO<sub>x</sub></li><li>• Trekkraft</li><li>• Produksjon av drivstoff</li><li>• Mindre kraft og høyere drivstofforbruk enn diesel</li></ul>

### 4.2 Naturgass/LNG

#### Teknologi

Naturgass som drivstoffkilde er i allerede i bruk innenfor skipsfart, i busser og biler. I busser og biler er det først og fremst komprimert naturgass (CNG) som brukes. Liquefied natural gas (LNG) har vært brukt som drivstoff innen skipsindustrien i mange år allerede, og den første LNG drevne fergen, MF Glutra, ble tatt i bruk i Norge tidlig på 2000-tallet (Fjord1, 2015). LNG er helt i startfasen når det kommer til tog. Skal man bytte ut diesel med ren LNG, må det gjøres store endringer på motorene. Det som er vanlig i dag er å benytte en blanding på 10% diesel og 90% LNG, der dieselen først antennes ved trykk, som igjen antenner LNG. Det mest lønnsomme vil derfor være å kun bytte ut diesel med LNG, fordi man da slipper omfattende endringer i drivstoffsystemet på eksisterende tog. Økt bruk av LNG som energikilde i transportmidler vil gjøre teknologien mer tilgjengelig for tog industrien. I USA anses LNG

som det drivstoffet som vil ta over rollen som hoveddrivstoff for tog i nærmeste fremtid (Lo, 2013).

### **Gjennomførbarhet**

LNG kan anvendes på lik linje med diesel, og kan brukes overalt på eksisterende bane. I dag er det begrenset tilgang på LNG i nærheten av Nordlandsbanen (Thomassen, Møller-Holst, & Midtun, 2014). Siden det er begrenset tilgang vil det koste en del å få opp en forsyningskjede med LNG. Energien i LNG er omtrent 60% av ekvivalent mengde diesel. Dette medfører at man må frakte med seg mer drivstoff for å kunne kjøre samme strekning som ved bruk av diesel. Dette vil igjen gjøre at togene blir tyngre, som påvirker drivstofforbruket. Som følge av at man trenger å frakte med seg mer drivstoff, vil togene kunne bli lengre eller få redusert mengden nyttelast. Med tanke på at kryssningssporene på Nordlandsbanen i dag har begrenset lengde, kan dette være en utfordring, særlig for godstogene. LNG må holdes ved -160°C for å holde seg i væskeform, men på grunn av varmelekkasje til drivstofftanken vil noe LNG fordampe og gass slippes ut. Boil-off gassen kan minimeres ved å bruke utstyr som gjør at gassen kollapser og kondenserer til væske igjen. Rundt 10% av LNG som fylles, fordamper enten ved fylling eller ved boil-off (Couch, Leonard, & Chiang, 2010). Trekkraften til motorene vil reduseres noe ved overgang til LNG.

### **Miljø og økonomi**

Sammenlignet med elektrisitet produsert fra fornybare energikilder slippes det ut mye CO<sub>2</sub> ved bruk av LNG. Allikevel slipper LNG ut opptil 30% mindre CO<sub>2</sub> enn diesel (Lo, 2013). I tillegg reduseres utslippet av NO<sub>x</sub> med 80-90% og partikkelutslippet reduseres med rundt 70%, noe som er meget positivt for lokal miljøet.

Drivstoffkostnaden ved bruk av LNG er liten i forhold til diesel. I 2012 kostet LNG i overkant av en tidel av diesel for ekvivalent mengde energi (Lo, 2013). Selv om drivstofforbruket er høyere enn for diesel, vil de økonomiske besparelsene ved å gå over til LNG være merkbare. Investeringskostnadene knyttet til LNG drift er knyttet til endringer i motoren, samt utbygging av infrastruktur for fylling av drivstoff.

### **Fordeler og utfordringer**

Fordeler	<ul style="list-style-type: none"><li>• Kan benyttes overalt</li><li>• Betydelig reduksjon i lokale klimautslipp</li><li>• Billigere drivstoff</li><li>• Lave kostnader til drift av infrastruktur</li></ul>
Utfordringer	<ul style="list-style-type: none"><li>• Begrenset tilgang på drivstoff</li><li>• Investeringskostnader knyttet til drivstoff</li><li>• Boil-off fra LNG-tank</li><li>• Lavere trekkraft enn diesel og elektrisitet</li></ul>

## 4.3 Hydrogen

### Teknologi

I 2015 lanserer Toyota og Honda sine første hydrogenmodeller, og de andre bilprodusentene følger på fra 2017 og utover (Norsk hydrogenforum, 2015). Brenselcelleteknologi er ikke noe nytt, men det er bilindustrien som har vært ledende innen forskning på bruk av hydrogen til fremdrift. Siden teknologien viser seg å være anvendbar i små kjøretøy, engasjerer forskere over hele verden seg for å prøve å anvende teknologien på andre områder hvor tradisjonelle forbrenningsmotorer tidligere har vært løsningen.

Ved University of Birmingham har det blitt forsket på mulighetene for å anvende hydrogen som primærkilde til energi ved fremdrift av tog. I 2013 ble en artikkel fra en forskningsgruppe publisert der de hadde bygget en prototype av et hydrogentog. Testene av prototypen indikerte rask responstid på systemet når behovet for kraft ble endret. Videre viste testene at det var liten forskjell i ytelsen ved syklisk start og stopp sammenlignet med tilfeller med konstant fart. Dette er en stor fordel i forhold til lokomotiv som benytter tradisjonelle forbrenningsmotorer, hvor toppverdien for effektivitet som oftest først oppnås når toget har nådd konstant fart (Hoffrichter, Fisher, Tutcher, Hillmansen, & Roberts, 2014).

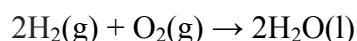
### Gjennomførbarhet

Om man bestemmer seg for å bytte ut diesellokomotiv med en hydrogenløsning, vil ikke dette by på andre problemer enn de som allerede eksisterer på dagens bane. Hydrogen som brenselcelle har en høy virkningsgrad opp mot 60%. Sammenlignet med dagens løsning, som bare har en virkningsgrad på 45%, er dette en stor forbedring. Trekkraften for hydrogentog kan dimensjoneres til opp mot 4400kW, noe som tilsvarer trekkraften til elektriske tog. Forskning viser også at 1kg H<sub>2</sub> tilsvarer omtrent 3,8L bensin (Semelsberger & Brooks, 2015). Det betyr at man bare trenger i underkant av 1/3 av mengde drivstoff (i vekt) for å drive et hydrogentog kontra et dieseltog (Jernbane.net, 2013).

En fungerende infrastruktur for å fylle hydrogen er avgjørende for å få i gang en større kommersiell bruk av fremkomstmidler som har hydrogen som primær energikilde. Utfordringene ved hydrogen vil være lagringen. Frem til nå har biler lagret hydrogen på 350 bar trykk, men de nyeste bilene som brukes nå, lagrer hydrogen på 700 bar. Ved å doble trykket, økes mengden som kan lagres i tankene, men mengden øker ikke proporsjonalt med trykket. En tank H<sub>2</sub> på 700 bar vil bare kunne lagre 60% mer enn en på 350 bar (Norsk hydrogenforum, 2015).

### Miljø og økonomi

En av de største fordelene ved bruk av H<sub>2</sub> som energikilde er at prosessen avgir null utslipp av skadelige stoffer til omgivelsene. Ligningen for den kjemiske reaksjonen er



Produktet er altså rent vann (Hydrogenics, 2013). Gitt at prosessen for å danne hydrogen er drevet av strøm fra fornybar energi, vil dette kunne betraktes som en 100% ren energikilde. Ulempene med denne metoden er at den ikke er utprøvd i stor grad på tyngre kjøretøy. Denne

energikilden er fortsatt i startfasen og dermed relativt dyr i innkjøp. Det vil dermed være store kostnader knyttet til forskning og utvikling av teknologien.

### **Fordeler og utfordringer**

Fordeler	<ul style="list-style-type: none"><li>• Ikke behov for utbygging av eksisterende jernbane.</li><li>• Null utslipp til omgivelsene</li><li>• Høy virkningsgrad (60%)</li><li>• Lang rekkevidde per tank</li></ul>
Utfordringer	<ul style="list-style-type: none"><li>• Drivstoffet er relativt kostbart å fremstille</li><li>• Må lagres under høyt trykk</li><li>• Teknologien er i startfasen</li></ul>

## **4.4 Elektrifisering**

### **Teknologi**

Elektrisitet brukes i dag som energikilde for 80% av togtrafikken (Jernbaneverket, 2015). For å kunne benytte elektrisitet kreves et kontaktledningsnett og omformere. Sammenliknet med dieseltog er elektriske tog sterkere, akselerer raskere og er rimeligere i drift og vedlikehold (Jernbaneverket, 2015). En utredning av NSB Bane fra 1994 viser at reisetiden på strekningen Trondheim - Bodø hadde blitt redusert med omtrent to timer ved elektrifisering (NSB Bane, 1994).

Fleksibiliteten knyttet til elektrisitet som energikilde for tog er relativt liten da den krever et kontaktledningsanlegg, samt lokomotiv som er tilpasset elektrisk drift. Til gjengjeld vil fleksibiliteten på strekningen Trondheim-Bodø øke, da man kan benytte andre elektriske lok ved eventuelle feil eller skader.

Elektriske tog er svært energieffektive, men omlag 20% av energien går tapt i omformerstasjonene og kontaktledningene. Ved å innføre autotransformatoranlegg vil dette tapet kunne halveres da overføringsspenningen økes (Jernbaneverket, 2015).

### **Gjennomførbarhet**

Da største delen av det norske jernbanenettet er elektrifisert, vet man at det er mulig å gjennomføre elektrifisering av Nordlandsbanen. Ved elektrifisering har Jernbaneverket tradisjonelt sett gått inn på regionalnettet, og alt av verneteknologi er derfor tilpasset dette spenningsnivået. Utfordringen på Nordlandsbanen er at nettstrukturen tilsier at man er nødt til å gå inn på sentralnettet. Dette vil medføre at Jernbaneverket vil være nødt til å tilpasse verneteknologien sin til høyere spenning. Dette vil føre til kostnader knyttet til forskning og utvikling, samt at verneteknologien i seg selv vil bli dyrere (Wikander, 2015). Dagens elektriske lokomotiv har betraktelig større trekraft, 4400 kW (Thomassen, Møller-Holst, & Midtun, 2014), enn diesellokene, og det vil derfor ikke være noen utfordringer knyttet til å møte dagens behov for trekraft på strekningen. Ved elektrifisering må man utvide tunellvernsnittet for å få plass til kontaktledningen. Dette vil være tidkrevende og påvirke togtrafikken i utbyggingsfasen.

Værforholdene er også en faktor som spiller inn. Vind kan sette en kontaktledning i svingninger slik at den hopper av. Is på kontaktledning og andre komponenter kan føre til komplikasjoner, men kan løses ved å sette varmetråder eller lignende på utsatte delene.

### **Miljø og økonomi**

En av de største fordelene med elektrifisering er at det ikke gir noen lokale utslipp av klimagasser. Hvor klimavennlig elektrisitet er, avhenger imidlertid av energikilden brukt til fremstilling. Elektrifisering er den energikilden som vil kreve størst inngrep i landskap, og landskapsestetikken vil bli negativt påvirket.

Jernbaneverket estimerer kostnadene knyttet til elektrifisering til å være mellom 15 og 20 millioner kroner per kilometer. Dette inkluderer kun kostnader til kontaktledning, omformere og enkelte nødvendig tiltak på den eksisterende banen (Teknisk Ukeblad, 2015). Da vil den totale kostnaden knyttet til elektrifisering av Nordlandsbanen ligge opp mot 15 milliarder kroner. Dersom man tar inn i betraktningen at 155 tunneler (Jernbaneverket, 2015) må utvides, som krever sprengningsarbeid, for å få hele strekningen elektrifisert vil kostnadene bli vesentlig større. Driftskostnadene knyttet til elektrisitet er ekstremt mye rimeligere enn diesel. I tillegg vil man ha mulighet til tilbakemating av regenerert energi, i form av bremseenergi, til nettet.

### **Fordeler og utfordringer**

Fordeler	<ul style="list-style-type: none"><li>• Bremseenergi kan selges til strømmettet</li><li>• Høy trekraft (4400 kW)</li><li>• Ingen lokale klimautslipp</li><li>• Reisetiden reduseres med to timer</li></ul>
Utfordringer	<ul style="list-style-type: none"><li>• Store investeringskostnader for kontaktledningsnett</li><li>• Dagens verneutstyr er ikke tilpasset sentralnettet</li><li>• Energitap i transformatorer</li></ul>

## 4.5 Batteri

### Teknologi

Batteridrift på tog er i dag ikke veldig vanlig. Batteridrift ble først tatt i bruk i tog på ammunisjonsfabrikker under første verdenskrig for å hindre gnistdannelse, og etter hvert i vedlikeholdstog når strømmen er koblet ut av kjøreledningen. Når det kommer til persontog har ikke batteri vært brukt i så stor grad, og den første prototypen av et helelektriske tog ble satt i drift i England i januar i år. De siste årene har bruken av elbiler skutt fart, og banet vei for mer effektiv og bedre batteriteknologi. Dette gjør at det produseres flere batterier til en lavere pris, noe som gjør teknologien mer tilgjengelig for togindustrien.

Batterier som eneste energikilde kan benyttes i lok i dag. utfordringene ligger i å dimensjonere batteriet i forhold til avstand mellom ladestasjonene, samt økt vekt som følge av batteriene. For at man skal kunne benytte batteridrift effektivt bør batteriene kombineres med regenerering av bremseenergi. I tillegg kan kondensatorer brukes ved akselerasjon og ved behov for mye strøm på kort tid. Hurtiglading på hver stasjon kan også brukes til å lade batteriene. Når det kommer til trekkraft til et batteridrevet tog, vil den være tilnærmet lik et elektrifisert lok

### Gjennomførbarhet

Et aspekt med batteridrift er at totallengden på toget vil kunne øke ettersom man må frakte med seg batterier. Dette kan enten gjøres i en dedikert batterivogn, eller at man har batteripakkene integrert i hver vogn. Sistnevnte løsning vil ikke påvirke lengden på toget. I dag mange av er kryssingssporene på Nordlandsbanen allerede korte, og lengre tog vil ikke være mulig. Man må derfor bruke litt av nyttelasten til batterier, noe som kan være problematisk for togselskapene.

Flexibiliteten til batteritog er god, så lenge det er strøm på batteriet og man har gode lademuligheter. Om man trekker linjer til elbiler er lademulighetene fortsatt begrenset, og batterikapasiteten er ikke så god uten at vekten øker betraktelig. Det kreves derfor en større utbygging av ladere. Verdens første batteridrevne ferge, Ampere drevet av Norled i Sogn og Fjordane, møter noen av de samme utfordringene knyttet til lading som man vil kunne møte ved tog. Hvis fergen skulle blitt hurtigladet på hvert stopp, ville ikke strømmettet i området håndtert belastningen. Løsningen ble å ha et stort batteri på hver ende av strekningen som står til kontinuerlig ladning, som igjen hurtiglader fergen ved hver stopp (Stensvold, 2014). Man unngår med dette store, ujevne laster på strømmettet. Dette er en løsning man også kan se for seg for tog, så togene kan hurtiglade ved hver eller utvalgte stasjoner.

### Miljø og økonomi

Når det kommer til miljø er batteridrift meget gunstig, så lenge energien som blir brukt til å lade batteriene kommer fra fornybare energikilder. Da vil batteridrift gi null utslipp. Det er i dag en diskusjon om hvor miljøvennlig batteridrift egentlig er, og da særlig rettet mot elbiler. I land hvor batterier produseres bruker man fornybare energikilder i mindre grad enn i Norge, og dermed er utslippene knyttet til batteriproduksjon merkbare. Man vil også få utfordringer med batteriene når de må resirkuleres etter nådd levetid.

Med batteridrift følger det med en del investeringskostnader knyttet til lading av batteriene. Ladningen kan gjøres på mange mulige måter, men en faktor er at toget ikke skal måtte stå lengre på hver stasjon enn det gjør i dag, for å ikke påvirke effektiviteten negativt. Driftskostnader vil i hovedsak gå til strøm for lading av batteriene. Elektromotorer er svært enkle med få bevegelige deler, så vedlikeholdskostnadene til drivverket vil kunne reduseres. Et viktig aspekt er at batteriene har en viss levetid, og vil bli dårligere etter hvert som årene går. Dagens batterier for elbiler har en forventet levetid på minst 8-9 år, men mest sannsynlig vil de vare ut bilens levetid. Bruken av batterier er veldig effektivt når det kommer til utlading og lading. Energien som kommer fra laderen går i stor grad til å lade batteriene istedenfor å gå tapt til for eksempel varme. Effektiviteten til utlading og lading er så høy som opp mot 90% (Thomassen, Møller-Holst, & Midtun, 2014).

### **Fordeler og utfordringer**

Fordeler	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kan benyttes på alle baner</li> <li>• Null utslipp ved bruk</li> <li>• Mindre støy og vibrasjoner</li> <li>• Flere batteriprodusenter redusere kostnaden</li> </ul>
Utfordringer	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Høye kostnader for batteriteknologi</li> <li>• Kostbart med hurtiglading</li> <li>• Økt vekt som følge av tunge batterier. Toget blir lengre på grunn av flere vogner med batterier</li> <li>• Utslipp knyttet til produksjon av batterier</li> </ul>



## 5 Hybridløsninger

### 5.1 Innledning

Hybrid betyr en sammensetning av flere elementer. I denne sammenhengen mener vi en kombinasjon av to eller flere energikilder som sammen kan fungere som drivkraften til et lokomotiv.

I 2013 ble det inkludert i Nasjonal transportplan at strekningen Trondheim-Steinkjer skal elektrifiseres, og at denne skal stå ferdig i 2021 (Hofstad & Persson, 2015). I lys av dette er det viktig å se på mulighetene for at en hybridløsning skal kunne benytte denne infrastrukturen. Hybrider vil også gi rom for å eliminere enkelte faktorer som taler mot de enkelte energikildene og gi nye muligheter til løsninger. Under presenteres ulike hybridløsninger som kan være mulige på Nordlandsbanen.

### 5.2 Elektrifisering & Diesel

Når strekningen Trondheim-Steinkjer er blitt elektrifisert, vil det være mulighet for å ha hybridlok som bruker kontaktledningsnett fram til Steinkjer, for så legge ned pantografen og bruke dieselmotor resten av strekningen. Denne hybridløsningen er allerede i bruk flere steder i Europa, og vil derfor være mulig å innføre uten kostnader for utvikling av ny teknologi eller investeringer i infrastrukturen (Briginshaw, 2014). Slike lok vil redusere nødvendigheten for skiftelok ved terminaler. En mulighet kan også være å lage et kontaktledningsnett ved stasjonene langs Nordlandsbanen. Dette vil gi mulighet for å bruke elektrisitet på vei inn mot stasjonene og i den energikrevende akselerasjonen ut fra stasjonene. Man vil kunne spare mye drivstoff, i tillegg til å redusere de lokale utslippene, med denne løsningen.

### 5.3 Elektrifisering & Biodiesel/LNG

LNG eller biodiesel kan som nevnt tidligere brukes i en lett modifisert dieselmotor. Dette vil derfor være en mulig løsning som gir de samme muligheten og fordelene som presentert i forrige avsnitt. Denne løsningen er imidlertid langt mer miljøvennlig.

### 5.4 Elektrifisering & Batteri

Med elektrifisering og batteri menes det at kontaktledningsnett brukes så lenge dette er tilgjengelig og batteriene på den resterende strekningen. Dette er en løsning som har vært i bruk ved blant annet undergrunnen i London (Bombardier, 2015). Den mest åpenbare løsningen vil være å bruke kontaktledningsnett frem til Steinkjer og batterier resten av strekningen. I tillegg, vil det også være mulig å sette opp kontaktledning på en lengre strekning nord for Steinkjer hvor batteriene lades opp. Dermed kan mengden batterier reduseres betraktelig. Her vil det da være nødvendig å utrede hvilke områder dette er hensiktsmessig og hvor det lar seg gjøre. Som nevnt tidligere vil dette bli vanskelig å gjennomføre med dagens batteriteknologi. Etter hvert som batterikapasiteten øker og vekten på batteriene minker, vil dette imidlertid kunne være en gunstig løsning.

## **5.5 Batteri & Diesel/Biodiesel/LNG/Hydrogen**

I likhet med elektrifisering, vil batterier kunne hjelpe til ved akselerasjon og på vei inn mot stasjonene for å redusere klimautslipp. Deretter vil andre energikilder være hoveddrivstoffet når toget har kommet opp i en ønsket hastighet. Mange av løsningene presentert i de foregående avsnittene kan brukes i kombinasjon med denne løsningen.

## **5.6 Hydrogen & batteri**

Ut i fra forsøket gjennomført av forskere fra University of Birmingham, som nevnt i 4.3, vil en hybridløsning mellom hydrogen og batteri være mulig å implementere i fullskalaløsninger for fremdrift i jernbanevirksomhet.

## **6 Valg av energikilder for videre studie**

Ut ifra de enkelte energikildene og hybridløsningene mellom disse, har valget falt på å ikke se videre på diesel og biodiesel som fremtidens energikilder på Nordlandsbanen. Begrunnelsen for dette, er at LNG har mange av de samme funksjonene som disse, men gir store fordeler i forhold til utslipp og økonomi. I tillegg vil det være interessant å se på batteridrift, elektrifisering og hydrogen, fordi disse har høy trekkraft, og kan gi store miljømessige fordeler i form av null utslipp. Vi skal dermed se nærmere på person- og driftssikkerheten rundt LNG, batteri, elektrifisering og hydrogen.

## 7 Personssikkerhet

I industrien i dag, finnes det utallige metoder og systematiske tilnærminger for å kartlegge risiko. Formålet med en risikoanalyse er å besvare tre grunnleggende spørsmål, 1) hva kan gå galt?, 2) hva er sannsynligheten for at den bestemte ulykken inntreffer?, og 3) hva vil konsekvensene være dersom ulykken inntreffer?

I rapporten benyttes metodene preliminary hazard analysis (PHA) og risikomatrise for å kartlegge personssikkerheten til de fire energikildene vi velger å se nærmere på. Evalueringene av personssikkerheten blir gjort ved hjelp av verktøyene ALARP, GAMAB og the precautionary principle.

### 7.1 Preliminary Hazard Analysis(PHA)

Metoden benyttes til å identifisere farer og potensielle ulykker i den tidlige delen av systemutviklingsfasen. Slik prøver en å skaffe seg en oversikt over hvilke energityper eller skadelige materialer som kan utløses uten forvarsel og omfanget av konsekvensene dersom dette ikke kontrolleres. Metoden kalles "Preliminary" nettopp fordi det er meningen at den skal oppdateres gjennom utviklingen av systemet og dypere studier av enkeltkomponenter og undersystemer. Gjennom en PHA vil en prøve å identifisere de mest åpenbare farene ved et system for så å kunne implementere løsninger for å fjerne, redusere eller kontrollere potensielle farer videre i systemutviklingen.

### 7.2 Risikomatriser

En risikomatrise er en tabulær illustrasjon av forholdet mellom frekvens og konsekvens av farlige hendelser. Den brukes til å illustrere resultatene fra en PHA slik at en lett ser hvor risikofylt de ulike tekniske løsningene er og hvor det må iverksettes tiltak for å redusere risikonivåene mest effektivt. Det finnes ingen fast standard på hvordan en risikomatrise skal utformes, men normalt deles frekvens og konsekvens inn i 3 - 6 kategorier med frekvens langs den horisontale akse og konsekvens på den vertikale.

### 7.3 Akseptkriterier for risiko

Når risikoanalysen er utarbeidet, må funnene vurderes opp imot fastsatte akseptkriterier. Det vil alltid finne risikoer for uønskede hendelser, uansett hvor mye en investerer eller trener personell. Sannsynligheten for uhell eller farer vil aldri bli lik null. Derfor er det etablert flere metoder og prinsipper for å fastsette gode akseptkriterier for risiko.

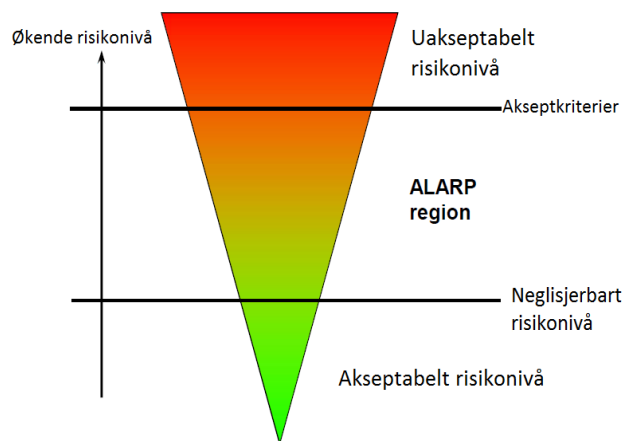
#### **ALARP -prinsippet**

Forkortelse for "As Low As Reasonably Practicable" og er rammeverket for enhver metode for å analysere og akseptere risiko. Gjennom anvendelse av denne metoden prøver en å avgjøre om det er økonomisk gunstig å foreta investeringer knyttet til en eventuell risikoreduksjon sett i forhold til fordelene med å implementere planlagte tiltak.

Når ALARP-prinsippet anvendes, antar en bare tre risikonivå, som illustrert i Figur :

1. Den uakseptable regionen:  
Risikonivået er utålelig og må reduseres for enhver pris dersom systemet skal kunne realiseres.
2. ALARP-regionen:  
Risikoreduserende tiltak er ønskelig, men kan unnlate å implementere tiltak dersom det viser seg å få betraktelig store økonomiske følger.
3. Den akseptable regionen:  
Her trengs ikke ytterlige risikoreduserende tiltak. Det vil være svært uøkonomisk å utføre tiltak her, derfor kan ressursene benyttes andre steder med mye større effekt.

## ALARP



Figur 2 ALARP-prinsippetets tre risikonivåer

### GAMAB –prinsippet

Forkortelse for det franske uttrykket “Globalement au moins aussi bon” som betyr “globalt minst like god”. Prinsippet antar at en akseptabel løsning allerede eksisterer og at den nye må være minst like sikker som den forrige. Uttrykket globalt er ganske sentralt i dette prinsippet, siden det gir rom for kompromisser. Enkelte aspekter med den nye løsningen kan tillates å være mindre sikre, dersom det overkompenseres med sikrere løsninger andre steder i systemet. Prinsippet benyttes i transportsektoren i Frankrike, der det kreves at nye systemer skal medføre et minst like lavt risikonivå som allerede eksisterende løsninger. Prinsippet er også benyttet i RAMS-standarden EN 50126 (1999) for jernbane (Rausand, 2011).

### The Precautionary Principle

Prinsippet er risikobasert, som betyr at risikostyringen baserer seg på numeriske antakelser av sannsynlighet for uforutsette svikt og potensielle skadeomfang (Klinke & Renn, 2002).

## 7.4 Akseptkriterier for risiko på Nordlandsbanen

En fullstendig risikoanalyse og en grundig risikoevaluering danner et godt grunnlag for avgjørelser om hvordan risikoene skal kunne kontrolleres mest mulig effektivt i videre arbeid med systemutviklingen. Etter risikoreduserende tiltak har blitt implementert er det også helt nødvendig at effektene av tiltakene overvåkes og måles slik at det er mulig å avgjøre om risikonivåene fortsatt er innenfor de fastsatte akseptkriteriene. Risikostyring er en kontinuerlig prosess, og det er derfor viktig med grundig oppfølging av implementerte tiltak for å avgjøre hvilke tiltak som viste seg å være effektive og hvilke som var unødvendige, for så å kunne overføre dette til kommende prosjekter.

For å enkelt kunne sammenligne de alternative energikildene opp imot dagens løsning, har vi utarbeidet en PHA for diesel. C betyr konsekvens, F betyr frekvens og RPN betyr risk priority number. PHAen for diesel vil danne grunnlag for de akseptkriteriene vi stiller til de alternative energikildene, da vi stiller krav om at personsikkerhet for de alternative energikildene må være minst like god som personsikkerheten for diesel. Verdiene i PHAene og risikomatrixene er basert på informasjonen om de ulike energikildene, og brukes til å vurdere energikildenes personsikkerhet opp mot diesel og til slutt med hverandre.

Tabell 1: PHA for diesel

Nr.	Fare	Årsak	Konsekvens	C 1-5	F 1-5	RPN 1-25	Risiko- reduserende tiltak
1	Punktering av diesel-tank	Kollisjon i lav hastighet	Moderate skader på tog, ingen skader på diesel-tank	3	4	12	
2		Kollisjon i høy hastighet	Store skader på tog, og kraftig brann	5	1	5	
3		Avsporing i lav hastighet	Moderate skader på tog. Ingen skade på dieseltank	3	4	12	
4	Lekkasje og utslipp	Kollisjon i høy hastighet	Store skader på tog, og store branner.	5	2	10	
5		Mangel på vedlikehold	Moderate skader på tog, og store branner.	5	4	20	
6	Antenning	Gnist ved fylling av diesel	Store skader på tog, stor brann	5	4	20	

Tabell 2: Riskiomatrise for diesel

K o n s e k v e n s	Frekvens				
		1. 1 pr 100 år	2. 1 pr 10 år	3. 1 pr 5 år	4. 1 pr år
Katastrofe 5	2	4		5, 6	
Stor 4					
Moderat 3				1, 3	
Liten 1-2					

Risikomatrisen viser at gnister ved fylling av diesel er en trussel for personsikkerheten og at vedlikeholdsrutiner må følges for at katastrofale konsekvenser skal kunne unngås. Det er også knyttet store faremomenter til punktering av drivstofftanker, både personlige og miljømessige konsekvenser. I henhold til ALARP-prinsippet, er det viktig å håndtere disse farene for å kunne kalle farene knyttet til et diesellok As Low As Reasonably Practicable.

## 7.5 Personsikkerhet ved de alternative energikildene

### 7.5.1 Naturgass/LNG

Naturgass er både lukt- og fargefri i sin naturlige form. For at eventuelle lekkasjer skal bli oppdaget tilsettes det derfor luktstoffer. Ved eventuelle lekkasjer vil gassen stige opp siden naturgass, som i hovedsak er metan (CH<sub>4</sub>), er lettere enn luft. Metan er en veldig effektiv klimagass, og kan lagre 30 ganger mer varme enn CO<sub>2</sub>, så lekkasjer bør ikke oppstå.

Naturgass har en høy antenningstemperatur på 540°C. Den kan ikke danne grunnlag for en eksplosjonsartet brann i friluft, og har dermed en klar sikkerhetsmessig fordel overfor andre drivstofftyper. Et annet moment ved personsikkerhet i forbindelse med håndtering av LNG, er selvsagt muligheten for å få frostskafer ved håndtering av LNG, siden det lagres ved -160°C

Energidepartementet i USA ferdigstilte en rapport om LNG-sikkerhet mot slutten av 2004, kalt Sandia-rapporten (Hightower, et al., 2004). Den er noe gammel, men faremomentene diskutert her vil fortsatt være gjeldene. Rapporten tar for seg mange forskjellige faremomenter knyttet til naturgass. Den diskuterer LNG til bruk på skip, men mange av momentene vil i stor grad være overførbare til togindustrien. Rapporten forklarer at sikkerheten ved alle anlegg som håndterer LNG skal tilpasses til en alvorlig hendelse med liten sannsynlighet. Hendelsene som ville gitt de mest fatale utfallene er i hovedsak knyttet til to scenarioer. Det ene er

kollisjon mellom to skip eller skade på ett skip, slik at gasstankene skades, og lekkasje oppstår. Dette kan overføres til kollisjon mellom to tog, eller skade på et tog. Dersom det går hull på en tank og dette antennes vil følgene bli svært alvorlige, og områder helt ut til 1600 m fra stedet vil kunne rammes av varmestråling. Man vil heller ikke ha noen mulighet til å stenge av tilførselen fra tanken. Siden naturgassene trenger 540°C for å antennes, og lagres ved -160°C, konkluderer imidlertid rapporten med at noe slikt er svært lite sannsynlig. En lekkasje vil likevel kunne være farlig. Selv om gassen ikke antennes på stedet vil gassen kunne drive med vinden, og antennes senere. Om gassene drives inn i befolkede områder vil dette kunne bli fatalt. Med de sikkerhetsforskriftene som foreligger for naturgass i dag, konkluderer rapporten med at dette vil være lite sannsynlig. Grunnstøting, som kan sammenlignes med avsporing i lav hastighet, utgjør ingen spesiell fare.

Tabell 3: PHA for naturgass

Nr.	Fare	Årsak	Konsekvens	C 1-5	F 1-5	RPN 1-25	Risiko- reducerende tiltak
1	Punktering av LNG-tank	Kollisjon i lav hastighet	Moderate skader på tog, ingen skader på LNG-tank	3	1	3	
2		Kollisjon i høy hastighet	Store skader på tog, og små branner dersom temperatur er høy nok	5	1	5	
3		Avsporing i lav hastighet	Moderate skader på tog. Ingen skade på LNG-tank	2	4	12	
4	Lekkasje og utslipp	Kollisjon i høy hastighet	Moderate skader på tog, og små branner.	5	1	5	
5		Mangel på vedlikehold	Moderate skader på tog, og små branner hvis temperaturen er høy nok	3	4	12	Vedlikeholds- rutiner, Computerized Maintenance Management System
6	Forfrysning	Fylling av LNG-tank	Frostskader ved håndtering av LNG	2	4	8	Sikkerhets- ventiler, Manuelle ventiler, hurtig- koplinger som krever kontakt med motpart for å åpnes

Tabell 4: Risikomatrixe for naturgass

K o n s e k v e n s	Frekvens					
		1. 1 pr 100 år	2. 1 pr 10 år	3. 1 pr 5 år	4. 1 pr år	5. 10 pr år
Katastrofe 5	2,4					
Stor 4						
Moderat 3	1			5		
Liten 1-2				3, 6		

Ut i fra denne PHAen og risikomatrixen, kan en se at godt planlagte vedlikeholdsrutiner for anlegget må utarbeides for å kunne holde personsikkerheten på et akseptabelt nivå. Punkt 6 med forfrysninger, kan forebygges gjennom sikkerhetssystemer og koblinger som ikke tillater strømninger uten å være sammenkoblet. Manuelle ventiler er også mulig å montere som dobbel barriere mot personskader. Vi ser at LNG er minst like sikker som diesel, i henhold til GAMAB, og derfor godkjent av EN 50126-standarden.

### 7.5.2 Hydrogen

Et viktig argument for bruk av hydrogen er at utslippet er helt ufarlig sammenlignet med andre drivstoff. Det fører hverken til skade på mennesker eller miljøet. I tillegg har hydrogen en høyere energitetthet enn komprimert naturgass. En positiv egenskap til hydrogengassen er at den sprer seg fort, det vil si at hydrogenkonsentrasjoner under normalt trykk, oppløser seg til ikke-antennelige nivå veldig hurtig. Det betyr i praksis at hydrogen har liten energitetthet per volumenhet dersom det skulle lekke ut til omgivelsene. Hydrogen stiger også veldig fort, og er dermed også en mindre trussel i tilfelle lekkasjer skulle oppstå, i forhold til andre drivstoff (The Internatioal Consortium for Fire Safety, Health & The Enviroment). Diesel og bensin lekker ut lokalt dersom en lekkasje skulle oppstå og risikoen for antennelse øker betraktelig i motsetning til hydrogen som lekker ut til atmosfæren og blir harmløs. I dag blir hydrogen lagret i biler som er utstyrt med tanker laget av sterke tanker av karbonfiber, så farene for punktering av tankene er minimale (Mearian, 2014).

Et forhold som truer personsikkerheten er lagringen av hydrogen. Det er nemlig beregnet at tankene vil inneholde hydrogen ved et trykk på 350 bar. Hydrogen har også en tendens til å brenne fremfor å eksplodere dersom tanken skulle punkteres og forholdene ligger tilrette for at hydrogenet som lekker ut antennes.



Tabell 5: PHA for hydrogen

Nr.	Fare	Årsak	Konsekvens	C 1-5	F 1-5	RPN 1-25	Risiko- reduserende tiltak
1	Punktering av Hydrogentank	Kollisjon i lav hastighet	Moderate skader på tog, ingen skader på hydrogentank	1	4	4	
2		Kollisjon i høy hastighet	Skader på tog pga. krasj, men hydrogen vil lekke til atmosfæren	4	1	4	
3		Avsporing i lav hastighet	Moderate skader på tog. Ingen skade på Hydrogentank	1	4	4	
4	Lekkasje og utslipp	Kollisjon i høy hastighet	Skader på tog, hydrogen vil lekke til atmosfæren	4	1	4	
5		Mangel på vedlikehold	Moderate skader på tog, hydrogen lekker til atmosfæren	4	4	16	
6	Eksplasjon		Store skader på tog, brann er mer sannsynlig enn eksplosjon	5	1	5	Spesial- utforming av vogner
7	Direkte kontakt	Søl ved fylling	Alvorlige frostska- der	5	1	5	Forebygges gjennom sikkerhets- ventiler

Tabell 6: Risikomatrix for hydrogen

K o n s e k v e n s	Frekvens					
		1. 1 pr 100 år	2. 1 pr 10 år	3. 1 pr 5 år	4. 1 pr år	5. 10 pr år
Katastrofe 5	6,7					
Stor 4	2,4				5	
Moderat 3						
Liten 1-2				1, 3		

Ut i fra risikomatriksen ser vi at et godt planlagt vedlikehold for et hydrogensystem vil være helt essensielt for å kunne ivareta personsikkerheten på hydrogentog. Faren med direkte kontakt vil kunne reduseres betraktelig gjennom sikkerhetsventiler og låsekoblinger som forhindrer fri flyt gjennom koblingen før den er koblet til et motstykke på fyllepunktet. Dette kan sammenlignes med hurtigkoblinger på hydrauliske system, med manuelle ventiler i tillegg. Dersom en sammenligner hydrogen med diesel, vil EN 50126-standarden være ivaretatt.

### 7.5.3 Elektrifisering

De største utfordringene knyttet til personsikkerhet ved elektrisitet som energikilde er forbundet med berøring av kontaktledningsnettet (Wikander, 2015). Dette gjelder vedlikeholdsarbeid, så fremt som berøring av sivile. En stor fordel når det kommer til elektrisitet er at toget ikke bærer med seg energikilden, og man unngår på den måten fare knyttet til eksplosjon og liknende i drivstoff.

Jernbaneverket stiller særdeles strenge krav til utførelse av vedlikeholdsarbeid på kontaktledningsnettet. I forbindelse med vedlikeholdsarbeid som krever kontakt med kontaktledningen må ledningen bli gjort strøm- og spenningsfri, for deretter å bli koblet til skinnegang for jording. Det er kun kyndig personale med spesiell utdanning som kan foreta dette arbeidet. Der en bro går over jernbane er det detaljerte regler for å forhindre at sivile kommer i kontakt med kontaktledningsnettet. Det stilles derfor krav om at det først er en stålplate, og deretter et fletteverksgjerde med en maskestørrelse på 12 millimeter, for å hindre ufrivillig kontakt med kontaktledningsnettet (Wikander, 2015).

Det vil alltid være fare knyttet til brann i elektromotoren. Dette er imidlertid ikke like kritisk som berøring av kontaktledningen, og vil ofte være mulig å gjøre noe med, i motsetning til

berøring der man omkommer momentant. Det vil derfor være viktig med godt oppsyn og vedlikehold av elektromotorene.

Tabell 7: PHA for elektrifisering

Nr.	Fare	Årsak	Konsekvens	C 1-5	F 1-5	RPN 1-25	Risiko- reduserende tiltak
1	Elektrisk støt	Berøring av kontaktledning	Fatalt utfall	5	2	10	Strengt regler for vedlikehold og for å forhindre at sivile kommer i kontakt med ledningen
2	Brann	Feil på elektromotor	Kritisk utfall	5	1	5	Gode vedlikeholdsrutiner av elektromotorer
3		Kortslutning	Brann	2	2	4	Strengt kontrollrutiner for sikringsskap og utsatte ledningsstrekninger. Inspeksjoner med EX-kamera
4	Direkte kontakt med elektrifiserte komponenter	Mangel på vedlikehold, beskyttelse slitt av	Brannskader	2	3	6	Strengt vedlikeholdsrutiner
5		Slitte kabler	Brannskader	1	3	3	

Tabell 8: Risikomatrix for elektrifisering

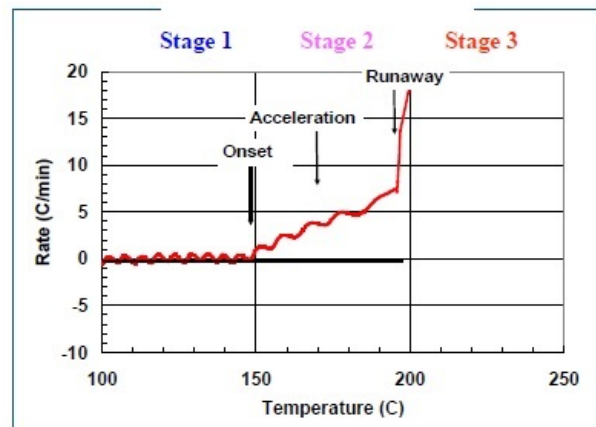
		Frekvens				
		1. 1 pr 100 år	2. 1 pr 10 år	3. 1 pr 5 år	4. 1 pr år	5. 10 pr år
K o n s e k v e n s	Katastrofe 5	2	1			
	Stor 4					
	Moderat 3					
	Liten 1-2		3	4, 5		

Ut i fra risikomatriksen kan en se at elektriske støt på grunn av berøring av kontaktledning er den største bekymringen når det kommer til personsikkerhet. Dette er ikke relevant for personell som reiser med toget, det er mer et problem for vedlikeholdspersonell, og derfor et viktig punkt å ta med videre når risikoreduserende tiltak skal utarbeides. Elektrisitet tilfredsstillende kravene fastsatt av EN 50126-standarden.

#### 7.5.4 Batteri

Batteriteknologien som er i vinden for tiden er litium-ion batterier. Disse batteriene brukes i portabel elektronikk, håndverktøy og lignende, og i elbiler. Siden mange elbiler bruker denne batteriteknologien, velger vi å se på sikkerheten rundt denne teknologien.

Termisk stabilitet er et av de viktigste aspektene når det kommer til sikkerhet for litium-ionbatterier. Ved kortslutning av et batteri eller en celle i batteriet vil det bli generert mye varme. Mekanismene som til vanlig transporterer bort varme, vil etter hvert ikke klare å håndtere den økte mengden av varme, noe som kan resultere i overoppheting og til slutt brann. Dette fenomenet kalles thermal runaway, som vist i Figur 2. Reaksjonen skjer veldig raskt og det er veldig vanskelig å bryte inn for å senke temperaturen. Thermal runaway trenger ikke oppstå mens batteriet er i bruk, og kan bli alt fra noen minutter og opp til mange dager forsinket. Dette har blant annet ført til at det ikke er lov til å bruke litium-ion batterier i fly. Mange hybridbiler bruker ikke litium-ionbatterier på grunn av faren for thermal runaway.



Figur 2 Thermal runaway

Fysiske skader som punktering, kollisjon, vibrasjon kan igjen føre til kortslutning som fører til uønsket oppførsel av batteriet. Generelt vil batterier med høyere energitettethet oppføre seg mer aggressivt ved slike skader. Skadene kan føre til termisk ustabilitet og utløse brann. Det oppstår sjelden kollisjoner mellom tog, så risikoen for thermal runaway på grunn av det anses som minimal. Muligheten for thermal runaway som følge av punktering og vibrasjoner er noe høyere, men siden batteriene brukes i bilindustrien, der sjansen for punktering og vibrasjoner er større enn for tog er risikoen begrenset.

Overlading er også et fenomen som kan påvirke batteriets termiske stabilitet, og kan oppstå hvis kontrollmekanismene til ladestasjonen eller batteriene feiler. Varmegenereringen kan dermed øke betraktelig. Den termiske responsen til litium-ion batteri ved overlading bestemmes i stor grad av kjemien til batteriet. Ekstern kortslutning er den vanligste feilen som kan påvirke batteriet, men siden varmeutviklingen ikke er så stor ved kortslutning påvirkes ikke den termiske stabiliteten i så stor grad.

Målet til de fleste batteriprodusenter er å øke kapasiteten til batteriene, slik at brukstiden til elektronisk utstyr og kjøretøy forlenges før de må lades. For å klare dette, økes energitettetheten

til batteriet, noe som igjen kan føre til mer aggressiv oppførsel ved feil. Dette gjør at kravene til sikre innkapslinger og battericeller øker.

Høy spenning og høy strøm er også viktige sikkerhetsaspekter. De største faremomentene er ved lading av kjøretøyet. Hvis det er feil på ladestasjonen, kan vedkommende som håndterer den få støt, noe som kan være fatalt. Allikevel begynner denne teknologien å bli godt utviklet og sjansen for å bli skadet ved vanlig og forskriftsmessig bruk vil være begrenset.

Tabell 9: PHA for batteri

Nr.	Fare	Årsak	Konsekvens	C 1-5	F 1-5	RPN 1-25	Risiko- reduserende tiltak
1	Brann	Kortslutning	Brann i batteri som kan spre seg	2	2	4	Brannsikre vegger i batterivogner
2		Overoppheting av batteri grunnet overbelastning	Brann i batteri som kan spre seg	2	3	6	Utrede metoder for tilstandskontroll. Termisk kameraovervåkning
3		Mangel på vedlikehold	Brann i batteri	2	4	8	Streng vedlikeholds-rutiner
4	Direkte kontakt med elektrifiserte komponenter	Kortslutninger	Kan føre til dødsfall eller brannskader	3	2	6	
5		Mangel på vedlikehold, beskyttelse slitt av	Brannskader	2	3	6	Streng vedlikeholds-rutiner
6		Slitte kabler	Brannskader	1	3	3	

Tabell 10: Risikomatrixe for batteri

		Frekvens				
		1. 1 pr 100 år	2. 1 pr 10 år	3. 1 pr 5 år	4. 1 pr år	5. 10 pr år
K o n s e k v e n s	Katastrofe 5					
	Stor 4					
	Moderat 3					
	Liten 1-2	1	2, 4	5, 6	3	

Brann som kan oppstå i batteriene, kan forebygges og reduseres gjennom design og materiell anvendt i vognene som huser batteriene. Branner som oppstår lokalt kan forebygges gjennom brannvarslersystem med høy tilgjengelighet og tilpassede testintervall. Et godt planlagt vedlikeholdssystem må til for at energikilden lar seg anvende i henhold til ALARP-prinsippet. Sett i forhold til GAMAB-prinsippet, vil batteriene være klassifisert i henhold til EN 50126-standarden.

## 7.6 Evaluering personsikkerhet

For å gjøre arbeidet med å sammenligne de alternative energikildene opp mot diesel og med hverandre enklere og mer håndfast, er det gjort et forsøk på å kvantifisere resultatene fra PHAene. For å kvantifisere resultatene er det valgt å bruke IRPA-verdien ved de ulike tilfellene. IRPA betyr Individual Risk Per Annum. Et individ er utsatt for fare  $a$ . Faren kan relateres til en spesiell situasjon, for eksempel å kjøre med tog på Nordlandsbanen. En relevant risikoindikator kan være sannsynligheten for at det enkelte individ mister livet på grunn av fare  $a$  i løpet av et år. Denne kvantifiseringsmetoden tar kun for seg dødsfall, så for å etablere et mer helhetlig risikobilde må vi også inkludere skader. Dette gjøres gjennom Potential Equivalent Fatality (PEF). Det er normalt å anta at 10 alvorlige skader kan betraktes som "like alvorlig" som et dødsfall, og 100 mindre skader antas også ekvivalent med ett dødsfall.

Om man ser på en person som reiser med toget mellom to stasjoner  $n$  ganger per år, er ulykkesfrekvensen  $\lambda$ . IRPA-verdi er definert som summen av produktet av ulykkesfrekvensen, sannsynligheten for at personen er om bord på toget og at personen omkommer gitt at den er om bord, som ligningen under viser:

$$IRPA_{\alpha} = \sum \lambda \cdot P(\text{Personen er om bord på toget}) \cdot P(\text{Personen omkommer} | \text{Personen er om bord})$$

Direkte dødsfall på grunn av avsporing er ekskludert, da dette vil være det samme for alle energikildene. Derimot, vil feilmodene som følge av en avsporing være mer relevante. Vi ser, som sagt, ikke på dødsfall relatert til selve avsporingen, men dødsfall som følge av at avsporingen resulterte i for eksempel eksplosjon i en dieseltank. I vår evaluering har vi satt sannsynligheten for at personen er om bord på toget til å være uavhengig av hvilken energikilde som blir benyttet, og denne faktoren er derfor ikke relevant å sammenligne. IRPA-verdier for hver enkelt energikilde:

*Tabell 11: IRPA-verdi for de ulike energikildene*

<b>Energikilde</b>	<b>IRPA -verdi</b>
Diesel	$85,6 \cdot 10^{-5}$
LNG	$1,2 \cdot 10^{-5}$
Hydrogen	$4,0 \cdot 10^{-5}$
Batteridrift	$1,7 \cdot 10^{-5}$
Elektrifisering	$1,8 \cdot 10^{-5}$

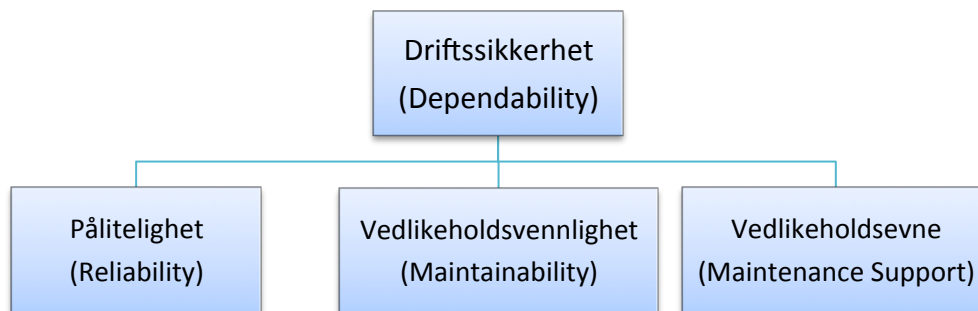
Dette er altså sannsynlighetene for at én person omkommer gitt at vedkommende reiser på Nordlandsbanen én ( $n = 1$ ) gang per år. Ut i fra denne oversikten, kan vi se at diesel er den minst sikre energikilden, med tanke på de feilmodene som er identifiserte i denne analysen. Det er også viktig å presisere at disse verdiene er baserte på en kvalitativ PHA, og dermed vil det knyttes en del usikkerhet til utfallet. Tabellen viser også at LNG har den laveste IPRA-verdien, og derfor er den beste løsningen sett i lys av personsikkerhet.

## 8 Vedlikehold og driftssikkerhet

Definisjonene i denne rapporten bygger på standarden NS-EN-13306 og skal sørge for at man unngår misforståelser på tvers av bedrifter eller bransjer. Begrepene nedenfor er innen vedlikehold og driftssikkerhet, og danner grunnlaget for vurderingene av vedlikehold og driftssikkerheten knyttet til de ulike energikildene.

### Driftssikkerhet

Definisjonen på driftssikkerhet er en enhets evne til å utføre krevd funksjon når den etterspørres (Standard Norge, 2010). Det er en rekke faktorer og samspillet mellom dem som utgjør en enhets totale driftssikkerhet. I hovedsak er det enhetens pålitelighet og vedlikeholdsvennlighet og vedlikeholdsevnen til organisasjonen som trekkes frem som hovedfaktorer, som vist i figur 3.



Figur 3 Sentrale begreper innen driftssikkerhet

### Pålitelighet

Med pålitelighet menes den evne en enhet eller et system har til å utføre en tiltenkt funksjon under gitte miljø- og driftsbetingelser, for en gitt tidsperiode (Standard Norge, 2010). Det er antatt at enheten er i stand til å utføre krevd funksjon i begynnelsen av tidsintervallet. Det er viktig at påliteligheten tas hensyn til i flere faser:

#### *Spesifikasjon og konstruksjonsfasen*

Det må settes opp mål for den pålitelighet man ønsker at en enhet skal ha. Videre må det sikres at enheten er dimensjonert for å tåle de påkjenninger og behandlinger den blir utsatt for (belastninger, miljøpåvirkninger, feilbetjening osv.) Valg av systemløsninger og materialer står her sentralt. En mulighet er også å doble antall enheter slik at hvis feil oppstår, kan en annen enhet overta funksjonen, kalt redundans (Bye, 2009).

#### *Driftsfasen*

I driftsfasen ønsker vi at enheten skal utføre krevd funksjon uten uforutsette svikt. I denne delen av enhetens levetid fokuserer vi på å opprettholde påliteligheten til et ønsket nivå. Resultat av svikt varierer med kritikaliteten til hver enkelt komponent, men de kan i verste fall føre til materielle, miljømessige og aller verste fall menneskelige skader.



### **Vedlikeholdsvennlighet**

Definisjon på vedlikeholdsvennlighet er den evne en enhet har, under gitte betingelser, til å være i eller tilbakeføres til en tilstand der den kan utføre en krevd funksjon. Det er forutsatt at vedlikeholdet blir utført ifølge gitte bestemmelser og ved hjelp av angitte prosedyrer (Standard Norge, 2010).

I praksis er vedlikeholdsvennligheten et mål på hvor effektivt en enhet lar seg vedlikeholde og måles i tiden fra alle nødvendige ressurser er på plass, til enheten er klar for oppstart. I vedlikeholdsvennlighet inngår operasjoner som feilsøking, reparasjon, funksjonstesting, og nedetiden er avhengig av blant annet hvor lett det er å finne feil, komme til for å utføre reparasjoner, og tilgjengelig teknisk dokumentasjon (Bye, 2009).

### **Vedlikeholdsevne**

Definisjon på vedlikeholdsevne er at en vedlikeholdsorganisasjon sørger for å ha de ressurser som kreves for å utføre vedlikehold på en enhet under gitte forhold og med en gitt vedlikeholdspolicy (Standard Norge, 2010). I praksis er vedlikeholdsevnen et måltall på hvor lang tid en vedlikeholdsorganisasjon bruker på å skaffe til veie alle nødvendige ressurser for å utføre aktivt vedlikehold. Vedlikeholdsevnen er avhengig av vedlikeholdsstrategien for enheten, kompetanse og hvor godt organisert organisasjonen er (Bye, 2009).

Pålitelighet, vedlikeholdsvennlighet og vedlikeholdsevne benyttes videre i oppgaven for å vurdere den overordnede driftssikkerheten knyttet til hver enkelt energikilde.

## **8.1 Driftssikkerhet ved dagens løsning**

### **Pålitelighet**

Siden løsningen med diesellok har blitt benyttet over en så lang periode, har bransjen hatt lang tid til å utvikle og optimalisere lokomotivene. Dette innebærer identifisering av kritiske komponenter og rotårsaksanalyser for å kunne avgjøre hvilke komponenter som trenger redundans, og hvilke som kan tillates å svikte før vedlikeholdstiltak iverksettes. Statistikk for midlere tid til feil (Mean Time To Failure) har også blitt utredet for enkeltkomponenter for å kunne sette sammen en optimal vedlikeholdsplan for både forebyggende og korrektive vedlikeholdsinngrep.

### **Vedlikeholdsvennlighet**

Siden denne teknologien har hatt så lang etableringstid, har organisasjoner utviklet prosedyrer og rutiner for utføring av vedlikehold på enhetene. Prosessene har blitt forbedret og optimaliserte over lang tid og dermed har vedlikeholdsvennligheten økt gradvis siden de først ble tatt i bruk. Prosesser og metoder for tilstandsdiagnostisering har også blitt utviklet over tid for denne typen teknologi. I en dieselmotor har en mange indikatorer som kan gi tilstrekkelig forvarslings tid før en eventuell svikt oppstår, lyd fra motor og kraftoverføringer og partikler oppdaget gjennom oljeanalyser er bare noen få av dem. Feilsøkingprosessen er også godt utviklet for denne typen system. Dette er en viktig faktor som er med på å redusere nedetiden ved eventuelle uforutsette svikt betraktelig.

### **Vedlikeholdsevne**

Helt siden diesellokene ble innført i Norge, har organisasjonene kunnet forbedre systemene sine for reservedelslagre ut i fra det godt etablerte vedlikeholdssystemet. Teknologien er godt utprøvd, og jo flere tilfeller og svikt en har, jo mer nøyaktig blir statistikkene for estimert levetid på komponenter. Dermed, kan en i høy grad forutsi når komponenter svikter og planlegge forebyggende tiltak slik at hver komponent blir utnyttet til det ytterste. Dette sørger også for at en har en jevn lagerflyt og en konsekvens vil være at få komponenter ligger lenge på lager og forringes. I og med at teknologien er så standardisert, er det lettere å skaffe til veie reservedeler på kort tid, noe som gjør at uforutsette svikt lettere kan utbedres gjennom korrektive vedlikeholdsinngrep.

## **8.2 Driftssikkerhet for de ulike energikildene**

### **8.2.1 LNG**

Per dags dato vet man ikke hvordan driftssikkerheten til lokomotiv drevet av LNG er, siden drivstoffet ikke blir brukt i veldig stor grad. Derfor har en valgt å se på erfaringene rundt driftssikkerheten til skip og ferger, da vi mener dette er overførbart til tog. Brukere av LNG-drevne skip rapporterer generelt om lavere vedlikeholdskostnader, enklere drift og bedre arbeidsmiljø enn dieseldrevet maskineri.

### **Pålitelighet**

I Norge er det i dag nærmere 30 skip som drives av LNG. Erfaringene fra tiår med LNG som drivstoff er meget gode og det er ikke registrert driftsforstyrrelser for skipene som skyldes LNG som drivstoff eller utstyr knyttet til dette (Gasnor, 2015). Siden skip ofte opererer i mer værharde områder enn tog, antar vi man vil oppleve samme, lave driftsforstyrrelse.

### **Vedlikeholdsvennlighet**

LNG er en fullgod erstatning til diesel og diesellojer når det kommer til vedlikeholdsvennlighet. Levetiden på enkeltkomponenter ved gassdrift er ikke mindre enn levetiden for tilsvarende komponenter i dieselmaskinerier. Erfaringer med LNG tilsier at vedlikeholdskostnadene blir lavere ved bruk av gassdrift, fordi gassen forbrenner renere enn konvensjonelle dieselmotorer. Dette fører til mindre sotdannelse og forenkling av vedlikeholdsarbeid som følge av renere innvendige motorkomponenter. Motorslitasjen er dermed ikke noe større enn ved bruk av diesel, og som en konsekvens av dette vil levetiden være like lang eller lengre enn ved bruk av diesel. Siden det ikke er noen tekniske begrensninger med LNG som drivstoff, vil driftssikkerheten i stor grad være lik eller bedre enn diesel. Det rapporteres heller ikke om negative tilbakemeldinger fra maskinister og maskinsjefer ombord på fartøy med gassdrift (Hætta, Nordbø, & Aarvold, 2011).

### **Vedlikeholdsevne**

Når det kommer til vedlikeholdsevne vil det ikke være store forskjeller med LNG i forhold til diesel, fordi det ikke fører til store endringer på motoren sammenlignet med diesel.

## 8.2.2 Hydrogen

### **Pålitelighet**

Hvor pålitelig et tog som benytter hydrogen til fremdrift er vanskelig å bestemme, siden metoden ikke er i kommersiell bruk. Feilrater for komponenter anvendt i systemet er dermed ikke tilgjengelig på samme måte som for komponenter i dieselmotorer. I følge en rapport fra SINTEF vil levetiden ligge på mellom 7 til 10 år, før en er nødt til å reaktivere enheten. Dette koster 3-4 millioner kroner per enhet. Vedlikeholdsintervall og omfang for å kunne ivareta dagens pålitelighet er vanskelig å fastsette ut i fra disse opplysningene (Thomassen, Møller-Holst, & Midtun, 2014).

### **Vedlikeholdsvennlighet**

Ved hydrogendrift er systemet veldig komplekst. Det kreves derfor spesialisert personell som har opplæring og kunnskap om systemet. Ved forbrenning av hydrogen er produktet vann. Soting vil derfor ikke være et problem, og rene komponenter vil gjøre vedlikeholdet enklere. Per dags dato er det ikke utarbeidet vedlikeholdsprosedyrer for et hydrogentog. Dette må etableres innad i organisasjonen og det vil ta lang tid å optimalisere disse prosedyrene. Foreløpig er det derfor naturlig å anta at vedlikeholdsvennligheten for hydrogen ikke er så god, men vil kunne bedres betraktelig når teknologien er mer utbredt og tatt i bruk i større skala.

### **Vedlikeholdstilgjengelighet**

Hydrogentog trenger ikke utbygging av kontaktledningsnett for å fungere, dermed vil alt av vedlikehold foregå på selve togene og en slipper vedlikehold av strukturer som står ute året rundt. Verktøy som må til for å utføre forebyggende og korrigerende vedlikeholdsinngrep er ukjente. Dersom dette viser seg å være kostbart og plasskrevende, vil det være ugunstig å utstyre alle tog med slikt utstyr.

Anskaffelse av komponenter som skal til for å vedlikeholde et hydrogentog er vanskelig å estimere, siden leveringstid på komponenter dimensjonert for å drive et tog er ukjente. Komponenter brukt i anlegg for hydrogen vil også være kostbare, i og med at trykkene er relativt høye, opp mot 350 bar, og temperaturene svært lave og varierende. Dette gjør også løsninger med 100% redundans svært ugunstige og kostbare. Foringelse av komponenter som ligger på lager er en stor utfordring på alle anlegg der 100% redundans er krevd. For dyre komponenter, som vi antar komponentene brukt i hydrogentog er, vil dette være aller høyst ugunstig.

Tilgjengelig personell er et viktig element i vedlikeholdstilgjengeligheten til en organisasjon. Siden hydrogen er en relativt ny teknologi til bruk i fremdrift av maskiner, er det også vanskelig å finne eksperter på området til å utføre vedlikeholdsinngrepene som kreves på utstyret.

### 8.2.3 Elektrisitet

#### **Pålitelighet**

Jernbaneverkets krever 100% redundans i hver omformerstasjon, slik at togtrafikken skal kunne operere ubemerket dersom en omformerstasjon havarerer. Dette kravet oppfylles ikke i dag, og dersom en omformerstasjon faller ut, vil man kunne oppleve saktegående togtrafikk, eller i verste fall full stans (Lie, 2013). Det jobbes i dag med å løse denne situasjonen, og noen forslag som er kommet på banen er såkalt mobile omformerstasjoner (Jernbaneverket, 2014). Mobile omformerstasjoner plasseres på strategiske punkt i kontaktledningsnett, basert på beregninger gjort av simuleringsprogrammer. Dette er med på å øke påliteligheten, og gir et mer fleksibelt system.

For å sikre påliteligheten kjører alle elektrisk drevne tog med bakre pantograf (Wikander, 2015). Grunnen til det er at dersom det forekommer en skade eller forhindring, slik som istapper, på kontaktledningsnett kan man, i det fremre pantograf har passert det kritiske punktet heve den og senke den bakre pantografen slik at toget kan passere uten problemer.

#### **Vedlikeholdsvennlighet**

De to store komponentene som Jernbaneverket må vedlikeholde ved elektrisitet som energikilde er omformere, både roterende og statiske, og kontaktledningsnett.

Lettere vedlikeholdsarbeid med roterende omformere er fjerning av støvdannelse og smøring av diverse komponenter med olje. Tyngre vedlikeholdsarbeid oppstår som en følge av tretthetsbrudd i omformeren. Da er den nødt til å transporteres med spesialtransport til Grorud hvor hovedverkstedet er. Det kan ta to uker fra vedtak om å sende omformeren på verksted til den er fremme på verkstedet på Grorud. Dette fordi omformeren til vanlig står inne i fjellet, og det derfor må legges en sporveksler for å få den ut av fjellet. De statiske omformerne benytter seg av halvlederteknologi, som må byttes ut forholdsvis ofte, i hvert fall sammenliknet med komponentene i de roterende omformerne (Wikander, 2015).

For kontaktledningsnett er det største vedlikeholdsarbeidet knyttet til overvåkning av kontakttråden, og at den henger helt nøyaktig i forhold til banetraséen. Sjeldnere vedlikeholdsarbeid oppstår i forbindelse med geologiske utglidninger i berggrunnen som gjør at stolper og påler flytter på seg, og dermed også kontakttråden (Wikander, 2015).

#### **Vedlikeholdsevne**

Når det kommer til vedlikeholdsevnen i forbindelse med omformere, har det mye å si om vi ser på en roterende eller statisk omformer. De roterende omformerne er den eldste av de to typene, og har vært brukt siden vi fikk elektriske togdrift rundt 1920. Overraskende nok er dette den typen det er knyttet minst vedlikehold til, og også den med best vedlikeholdsevne. Den lave vedlikeholdsevnen på statiske omformere skyldes at komponentene som må byttes ut ikke lengre finnes i sortimentet til leverandøren. Omformeren må derfor i noen tilfeller tilpasses noe til de nye komponentene (Wikander, 2015). Som en løsning på dette problemet bør Jernbaneverket inngå kontrakter med leverandørene som stiller krav til at de skal ha egnede reservedeler for en gitt tidsperiode, for eksempel 30-40 år.

Vedlikeholdsevnen ved normale forhold på kontaktledningsnett er forholdsvis høy. To ganger i året bruker Jernbaneverket en målevogn til å kjøre over ønsket strekning for å måle krefter mellom kontaktledningstråd og strømvogter. I tillegg varsler lokfører fra dersom de ser noen unormalheter når de kjører på rutene (Wikander, 2015).

#### **8.2.4 Batteridrift**

##### **Pålitelighet**

Teknologien i elektriske biler er fortsatt veldig ny og foreløpig vet man lite om påliteligheten, særlig om vinteren. Rekkevidden til elektriske kjøretøy om vinteren kan synke med opptil 50%, fordi batterikapasiteten reduseres når det blir kaldere. Rekkevidden om vinteren vil også avhenge av hvor mye batterikapasitet som brukes til oppvarming av toget. Typisk kan oppvarming redusere rekkevidden med inntil 20%. Det kan også gå vesentlig mer, men ved kombinasjon av varmpumpe kan dette reduseres. Sammenlignet med kjøretøy med forbrenningsmotor er elektriske motorer langt mer pålitelige.

##### **Vedlikeholdsvennlighet**

Det er de bevegelige delene, alt fra stempler til belter, som har en tendens til å feile i vanlige forbrenningsmotorer. Den store fordel med en elektrisk motor er at den bare har en roterende del, så det er veldig mye mindre som kan gå galt. Det er derfor store summer å spare på vedlikehold knyttet til motoren.

I motsetning til de fleste kjøretøy er det ikke en enkel jobb å sette inn et nytt batteri i et elektrisk kjøretøy. Batteriene er ofte veldig tunge og klumpete, og kan veie opptil flere hundre kilo. Imidlertid er batteriene ofte satt sammen av flere celler, så hvis en av dem ryker er det mulig å skifte ut en og en. Dette gjør vedlikeholdet betydelig enklere og mer kostnadseffektivt.

Det er i hovedsak to mulige feil som kan oppstå med elektrisk drift. Disse er problemer med batteriet og tilkoblingene til de elektriske enhetene. Siden det elektriske systemet er ganske komplisert, vil man trenge spesialutstyr og ekspertise for å spore eventuelle defekter. Imidlertid er det relativt få problemer med tilkoblingene, og batterisvikt oppstår forholdsvis sjeldent.

##### **Vedlikeholdsevne**

Hvis de elektriske motorene går i stykker, bør det være ganske enkelt å få tak i nye, ettersom elektriske motorer allerede brukes i utstrakt grad i samfunnet. Når det kommer til tilgangen på batterier kan det være litt større utfordringer. Det er relativt få kjøretøy som har batteridrift på verdensbasis, og det produseres dermed ikke så mange batterier. Det virker imidlertid som at særlig elbilmarkedet har fått en oppsving de siste årene, noe som vil gjøre tilgjengeligheten til batterier bedre.

### 8.3 Konklusjon for driftssikkerhet

Når det kommer til hvor lett det er å skaffe til veie alle midler som skal til for å vedlikeholde et lokomotiv, må det tas hensyn til tilgjengeligheten. En kommersiell teknologi vil ha flere leverandører av reservedeler og dermed korte leveringstider. Dette gjør det også lettere for organisasjonen som skal drifte enheten å ha små delelager og dermed slippe å binde opp store kapitaler i reservedeler. Diesellok har naturlig nok en stor fordel når det kommer til vedlikeholdsevne på akkurat Nordlandsbanen, da det allerede finnes godt etablerte rutiner for vedlikeholdsarbeid og reservedelstyring. LNG har mye av det samme maskineriet som en kommersiell dieselmotor, men i tillegg vil den renere forbrenningen i systemet øke vedlikeholdsvennligheten. Derfor er denne energikilden en reell utfordrer til diesellok basert på driftssikkerheten.

Foreløpig vil hydrogen slite med å nå opp til driftssikkerhetsnivået til en så veletablert teknologi som diesel. Dette er først og fremst fordi energikilden er lite utbredt, og det er derfor vanskelig å bestemme akkurat hvor pålitelig systemet vil være i sammenheng med tog.

Alternativene med elektrifisering og batteridrift har klare fordeler i at de har mindre bevegelige deler, og dermed mindre komponenter som kan feile i toget. Batteriteknologien er fortsatt i en tidlig fase satt opp imot dieselmotoren, men ser man på elbiler, blir de stadig mer utbredt og rekkeviddene øker for hver modell som produseres. Når det gjelder elektrisitet er dette en løsning som benyttes i utstrakt grad, og det antas derfor at driftssikkerheten og vedlikeholdsevnen til elektrisitet er på et akseptabelt nivå. Derfor vil elektrisitet være et fullgodt alternativ til diesel sett i lys av driftssikkerhet.

## 9 Diskusjon

Gjennom diskusjonen er målet å komme frem til hvilke energikilder vi ser for oss kan erstatte diesel på Nordlandsbanen. Temaene vi legger til grunn for vår vurdering av energikildene er de følgende seks kriteriene: nødvendig infrastruktur, økonomi, trekraft, miljøaspekter, og person- og driftssikkerhet.

Vi ser for oss å gjøre minst mulig endringer i infrastrukturen. Det vil selvfølgelig måtte bli noen endringer avhengig av hvilke energikilder man velger, men omfanget vil variere. Det er også viktig å vurdere trekraften til de alternative energikildene, og de bør være på like linje eller bedre enn diesel. Når det kommer til miljøaspektene, ønsker vi å foreslå en løsning som reduserer utslippene både lokalt og globalt. Dette punktet er veldig aktuelt i dag, og når man først skal innføre en ny energikilde, er det ønskelig at utslippene nærmer seg null. Økonomi er et veldig avgjørende punkt. Investeringene knyttet til de ulike energikildene vil variere mye, og vi ønsker at disse kostnadene skal bli lavest mulig, så lenge den foreslåtte løsningen vil være minst like god eller bedre enn dagens løsning. Økte kostnader kan forsvares hvis den samfunnsmessige nytten øker betraktelig. Når det kommer til personsikkerhet, vil foreslått løsning måtte være like god eller bedre enn diesel. Risikoen for en ulykke skal være så lav som mulig, og konsekvensene ved en eventuell ulykke skal være minst mulig. Det er vanskelig å eliminere risikoen for ulykker helt, men er reduksjon fra dagens nivå er ønskelig. Videre vil driftssikkerhet være viktig, og det er satt som krav at togene skal være minst like effektive og driftssikre som dagens løsning. Det er ønskelig at kostnadene knyttet til vedlikehold blir lavest mulig.

Utbygging av nødvendig infrastruktur varierer for de ulike energikildene. For LNG, batteri og hydrogen vil man kunne benytte store deler av dagens infrastruktur. Det vil heller ikke være behov for å forsterke allerede eksisterende jernbanelinjer siden vekten på toget vil ende opp på samme nivå som et vanlig dieseltog. Dette gjelder også ved elektrifisering. Sistnevnte poeng vil ikke gjelde for batteridrift, da vektøkningen er avhengig av antall batterier. LNG vil gi mindre vedlikehold og er et billigere drivstoff enn diesel, men det vil allikevel påløpe kostnader knyttet til ombygging av motorene i lokene. Det vil også være behov for ombygging av nåværende infrastruktur, særlig nye fyllestasjoner for drivstoff. Siden tilgangen på LNG er begrenset i dag vil det også bli nødvendig å bygge opp en forsyningskjede av LNG. Vi anser imidlertid disse kostnadene som forsvarlige, og de vil bli betraktelig lavere enn ved å gå over til elektrisitet. Kostnadene for elektrifisering av Nordlandsbanen er estimert til å bli opp mot 15 milliarder kroner. Det er i hovedsak infrastrukturen det må gjøres noe med på denne strekningen. Kontaktledningsnett må bygges, tunneler må utvides for å få plass til kontaktledningen og bruer må heves. I tillegg er det utfordringer i forhold til klimaet ved bygging av kontaktledningsnett, noe som også kan øke kostnadene til vedlikehold. Ved batteri- og hydrogendrift må også ny infrastruktur bygges. Ved batteridrift trengs det lademuligheter og for hydrogendrift trengs det egne fyllestasjoner. Sammenlignet med dieseldrift, vil det altså påløpe kostnader knyttet til infrastruktur for alle de fire alternative energikildene.

Et annet aspekt ved valg av alternativ energikilde er kryssningssporene. Disse har begrenset lengde, noe som setter en begrensning på lengden på toget som kan gå på denne strekningen. I snitt er kryssningssporene 600m lange, mens de korteste er rundt 300m, noe som er for kort for de fleste godstogene (Nicolaisen, 2014). Dette kan også bli et problem ved batteridrevne tog, fordi batteriene vil ta stor plass og føre til at man trenger egne vogner som kun inneholder batterier. Konsekvensen vil være at nyttelast må ofres til fordel for batteriene, noe som ikke er gunstig, verken for persontransport eller godstrafikken. For de andre energikildene vil ikke dette være et stort problem.

For at togenes effektivitet skal kunne opprettholdes er det essensielt at trekraften er på lik linje med dagens løsning, om ikke bedre. Både elektrisitet, batteridrift og hydrogendrift vil ha betydelig større trekraft enn dagens løsning, opp mot 4400kW. LNG skiller seg litt ut i forhold til de andre, og vil levere trekraft tilsvarende eller litt dårligere enn diesel. Dette vil imidlertid ikke være kritisk da det vil være mulig å bygge LNG motorer som har like god trekraft som dieselmotorer. Men ved bruk av en ombygd dieselmotor, som er aktuelt i vårt tilfelle, vil man kunne oppleve litt dårligere trekraft. Alle de nevnte energikildene vil derfor tilfredsstillende kravet til trekraft.

Det er store miljømessige forskjeller for de forskjellige energikildene. Å redusere utslippene vil gi miljømessige fordeler både på kort og lang sikt. Om vi forutsetter at energien som blir brukt til å produsere hydrogen, strøm til batteriene og strøm i kontaktledningsnettet kommer fra fornybare energikilder, er det kun LNG som vil gi utslipp. Norge er imidlertid ikke et lukket kraftmarked og man må derfor regne med at ikke all energien er helt fornybar. Uansett vil de lokale utslippene knyttet til hydrogen, strøm og batteri være null. Når man sammenligner LNG med diesel, ser man imidlertid at utslippene kan reduseres drastisk. CO<sub>2</sub> kan reduseres med opp mot 30%, NO<sub>x</sub> opp mot 90% og partikkelutslipp kan reduseres med opptil 70%. Dette vil hjelpe mye på det globale miljøet, men det er særlig lokalmiljøet som vil oppleve en betydelig reduksjon i utslippene. En mulighet for å redusere utslippene ved LNG-drift ytterligere, er å kombinere LNG med batteri eller elektrifisering. Man kan dermed bruke elektrisitet der det er mulig, og batterier i akselerasjonsfasen og inn mot stasjonene. Det er ingen tvil om at LNG vil være en betydelig forbedring i forhold til diesel når det kommer til utslipp. På lengre sikt er det allikevel ønskelig å nærme seg null utslipp, og LNG tilfredstiller ikke det kravet. Da vil enten elektrifisering av hele strekningen, batteridrift eller hydrogen være nødvendig.

Gjennom en nærmere trendanalyse av risikomatrixene for hver enkelt energikilde, ser vi at det er mangel på vedlikehold som er den største trusselen for personsikkerheten. En ting er at konsekvensene knyttet til mangel på vedlikehold kan bli katastrofale, men frekvensen av manglende vedlikehold kan bli relativt stor. Alle de alternative energikildene tilfredstiller EN 50126-standarden, men man kan allikevel se noen ulikheter. Sammenligner man risikomatrixene til de ulike energikildene, og IRPA-verdiene i Tabell 11, kan man se at personsikkerheten til LNG er god, og bedre enn for diesel. Dette er særlig fordi risikoen for at LNG antennes er lavere enn for diesel. I kombinasjon med batteri blir heller ikke personsikkerhet bli redusert. Man kan også se at sikkerheten ved elektrifisering er bedre enn for diesel. Når det kommer til hydrogen, vil hydrogengass spre seg fort og oppløse seg til



ikke-antennelige nivå veldig hurtig ved lekkasjer. I forhold til diesel, vil dette føre til mindre risiko for ulykker i tilfelle lekkasjer skulle oppstå. Hydrogen har også en tendens til å brenne fremfor å eksplodere dersom tanken skulle punkteres og forholdene ligger til rette for at hydrogenet som lekker ut skulle antennes. Det høye trykket hindrer at flammene brenner innover i tanken og får antent alt stoffet samtidig, dermed redusert eksplosjonsfare.

Når det kommer til driftssikkerhet, er viser analysene over at LNG gunstig. Sammenlignet med diesel, vil LNG ha en renere forbrenning. Som følge av dette, vil man trenge mindre vedlikehold og vedlikeholdet som må gjøres er enklere på grunn av renere komponenter. Levetiden til motorene vil dermed kunne øke. En konsekvens av dette vil være økt pålitelighet for togene, og man vil dermed få færre driftsstanser. Dette vil slå positivt ut for brukere av togene. Når det kommer til driftssikkerheten ved bruk av hydrogen er det noe usikkert, siden hydrogen i store fremkomstmidler ikke er utbredt i stor grad enda. Etter hvert som hydrogen blir tatt i bruk, vil man få et tydeligere bilde over driftssikkerheten. Erfaringer om driftssikkerheten fra tidligere elektrifiserte strekninger er i dag god, og vi ser ingen grunn til at en elektrifisert Nordlandsbanen skal ha dårligere driftssikkerhet. Erfaringene rundt batteriene i elbiler er med på å utvikle batteriteknologien, slik at man etter hvert kan få ren batteridrift i tyngre fremkomstmidler. Foreløpig er usikkerheten rundt lading av batteriene et usikkerhetsmoment, noe som gjør at kun batteridrift ikke vil være driftssikkert nok. Man kan se for seg løsninger hvor hele batteripakker eller batterivogner kan byttes ut, men det vil være kostbart å ha batteridepoter med jevne mellomrom på strekningen.

## 10 Konklusjon

På basis av funnene i rapporten har vi valgt bort elektrifisering av hele strekningen som løsning. Investeringskostnadene ved elektrifisering vil være enorme i forhold til en hybridløsning. De tekniske fordelene, trekraft og akselerasjon, ved elektrifisering er ikke mye større enn for hybridløsningene. Sammen med at de sikkerhetsmessige fordelene ved elektrifisering kontra LNG heller ikke er markante, blir investeringskostnadene vanskelige å forsvare.

Gjennom vårt arbeid har vi kommet fram til to ulike løsninger, en som kan være mulige på kort og en med tanke på lang sikt. På kort sikt ser vi for oss at et bytte av drivstoff fra diesel til LNG vil være gunstig, på grunn av en dramatisk reduksjon av lokalutslipp og en betraktelig økning i personsikkerheten. Dette er gjennomføres med en gang, og krever kun små endringer i dieselmotorene. En videre utvikling vil være at togene skal kunne benytte elektrisitet frem til Steinkjer, og kjøre på LNG videre til Bodø. Dette ser vi for oss at kan implementeres på strekningen i 2022, året etter elektrifiseringen av strekningen Trondheim-Steinkjer. Reduksjonen av utslipp vil da bli ytterligere redusert. Etter hvert som batteriteknologien forbedres, med større rekkevidde og lavere vekt, vil denne teknologien i kombinasjon med LNG kunne være en løsning. Elektrisitet benyttes dermed til Steinkjer, og videre derfra benyttes LNG i kombinasjon med batterier som hovedbrensel. Batteriene brukes når toget nærmer seg stasjoner og i akselerasjonsfasen ut av stasjonene, fordi det er gunstig for lokalmiljøet. Vi ser for oss ulike måter for å lade batteriene underveis. Enten kan det settes opp kontaktledningsnett på hver stasjon, og lade batteriene mens toget står på stasjonen, eller det kan settes opp kontaktledningsnett på en forholdsvis lang del av strekningen, noen mil, som kan brukes til å lade batteriene under kjøring. På lengre sikt ser vi for oss at hydrogen kan være en mulig løsning. Teknologien er per dags dato under utvikling og ikke moden for å bli tatt i bruk i større skala. Teknologien er også svært kostbar. Ved å benytte hydrogen oppnår man nullutslipp, så lenge hydrogenet er produsert med fornybare energikilder. Også hydrogen kan kombineres med batterier, som kan ha samme funksjon som i kombinasjon med LNG.

Personsikkerheten for både den kortsiktige og langsiktige løsningen er akseptable og er bedre enn for dagens løsning. Dette er i tråd med Jernbaneverkets sikkerhetspolitikk, der de ønsker å forbedre sikkerheten for å kunne nå målet om null ulykker. Driftssikkerheten til LNG er bedre enn diesel, men når det kommer til hydrogen er det fortsatt en viss usikkerhet.

Løsningene vi har kommet fram til vil være gunstig med tanke på miljøet, både den kortsiktige og langsiktige. De lokale utslippene i form av NO<sub>x</sub> og sotpartikler, reduseres ved bruk av LNG, og vil falle bort ved bruk av hydrogen. LNG vil imidlertid gi litt høyere drivstofforbruk. Økonomisk sett, vil LNG også lønne seg i forhold til dagens løsning, da prisen for LNG er rundt en tittel av diesel. Prisen for hydrogen er i dag høy som følge av utvinningskostnadene. På lengre sikt regner vi med at prisen vil gå ned, etter hvert som teknologien forbedres og flere fremkomstmidler tar i bruk hydrogen. Det vil komme noen kostander knyttet til infrastrukturen for LNG og hydrogen, men om man sammenligner med å elektrifisere hele strekningen, vil det bli betraktelig rimeligere.

Når det kommer til reisetid vil denne kunne bli noe forkortet som følge av elektrifiseringen av strekningen til Steinkjer. Mer kraft som gir hurtigere akselerasjoner, gjør at noe tid kan bli spart. Tidsbesparelsen nord for Steinkjer vil bli mer begrenset så lenge det ikke blir bygd ut dobbeltspor. Man kan allikevel spare tid i akselerasjonsfasen, ved å benytte batteriene om bord.

## **11 Forslag til videre arbeid**

Våre foreslåtte hybridløsninger er enda ikke i kommersiell bruk. Det vil derfor kreve noe mer arbeid for at disse løsningene skal bli optimale. LNG-drift har i større grad blitt testet for store maskiner, enn for batteri og hydrogen, og man er i den fasen at man kan begynne å ta det i bruk. Allikevel må det gjøres en jobb med infrastrukturen. Fyllestasjoner må plasseres på strategisk riktige steder, og tilgangen til LNG må økes. Det videre arbeidet bør derfor fokuseres rundt infrastrukturen som skal til for at LNG skal kunne bli en fullgod erstatning for diesel-elektrisk drift.

Det er fortsatt usikkerhet rundt teknologiene knyttet til batteri og hydrogen, særlig for hydrogen. Når det kommer til batteridrift, er fortsatt batterilevetiden og vekt begrensende faktorer. Det kreves mer forskning og utvikling på dette området før man kan bruke batterier som en fullverdig energikilde. I tillegg bør arbeidet rettes mot kombinasjonen mellom batteri og LNG, og løsninger knyttet til effektivisering av denne hybridløsningen, da denne teknologien kan tas i bruk når batteriteknologien er godt nok utviklet. Videre trengs det mer kunnskap rundt bruk av hydrogen som drivstoff i tyngre maskineri. Etter hvert som teknologien blir mer moden, bør det utredes videre hvordan denne teknologien kan benyttes optimalt i tog, og hvordan infrastrukturen bør legges opp for at hydrogen skal bli en effektiv energikilde i fremtiden.

## 12 Referanser

- Bane, N. (1994). *Elektrifisering og modernisering av Nordlandsbanen*. NSB.
- Bombardier. (2015, Februar 10). *Bombardier Celebrates Innovative Battery Powered Train*. Hentet Mars 18, 2015 fra <http://www.bombardier.com/en/media-centre/newsList/details.bombardier-transportation20150210bombardiercelebratesinnovativeb0.bombardiercom.html>
- Briginshaw, D. (2014, September 25). *Electro-diesel locomotive debuts at InnoTrans*. Hentet Mars 04, 2015 fra <http://www.railjournal.com/index.php/locomotives/electro-diesel-locomotive-debuts-at-innotrans.html>
- Bye, P. I. (2009). *Vedlikehold og driftssikkerhet*. Trondheim.
- Couch, P., Leonard, J., & Chiang, H. (2010, April). *Demonstration of a Liquid Natural Gas Fueled Switcher Locomotive at Pacific Harbor Line, Inc*. Hentet Februar 18, 2015 fra [http://www.google.no/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CB4QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.glmri.org%2Fdownloads%2FIngMisc%2FPortofL ongBeachLNGforLocomotives.pdf&ei=ttc4Vd3\\_McimsAHy9IGIBg&usq=AFQjCNG raULs4RwK9d1wkQNDikSul7CiAw&sig2=-WlQtkAcSBpg7yi2m](http://www.google.no/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CB4QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.glmri.org%2Fdownloads%2FIngMisc%2FPortofL ongBeachLNGforLocomotives.pdf&ei=ttc4Vd3_McimsAHy9IGIBg&usq=AFQjCNG raULs4RwK9d1wkQNDikSul7CiAw&sig2=-WlQtkAcSBpg7yi2m)
- European Biofuels. (2015, Mars 25). *Biofuels for rail transport*. Hentet April 08, 2015 fra [www.biofuelstp.eu/rail-biofuels.html](http://www.biofuelstp.eu/rail-biofuels.html)
- Fjord1. (2015). *Fjord1 i tet på miljøteknologi*. Hentet Februar 11, 2015 fra [www.fjord1.no/om-fjord1/miljo](http://www.fjord1.no/om-fjord1/miljo)
- Gasnor. (2015). *Shell*. Hentet Mars 18, 2015 fra <http://gasnor.no/drivstoff-skip/ing-som-drivstoff/>
- Hightower, M., Gritzo, L., Luketa-Hanlin, A., Covan, J., Tieszen, S., Wellman, G., . . . Ragland, D. (2004). *Guidance on Risk Analysis and Safety Implications of a Large Liquefied Natural Gas (LNG) Spill Over Water*. Sandia.
- Hoffrichter, A., Fisher, P., Tutchter, J., Hillmansén, S., & Roberts, C. (2014). *Performance evaluation of the hydrogen-powered prototype locomotive "Hydrogen Pioneer"*. University of Birmingham.
- Hofstad, S., & Persson, A. K. (2015, Februar 16). *nrk.no*. Hentet fra Vil ha nye togsett på Trønderbanen: <http://www.nrk.no/trondelag/vil-ha-nye-togsett-pa-tronderbanen-1.12210844>
- Hydrogenics. (2013). *Fuel cells*. Hentet Mars 11, 2015 fra [www.hydrogenics.com/technology-resources/hydrogen-technology/fuel-cells](http://www.hydrogenics.com/technology-resources/hydrogen-technology/fuel-cells)
- Hætta, J. A., Nordbø, K., & Aarvold, O. A. (2011). *Økt sluttbruk av LNG på norske skip*. Høgskolen Stord/Haugesund.

- Jernbane.net. (2013). *NSB Type 93*. Hentet Februar 04, 2015 fra <http://www.jernbane.net/norge/bm/bm93/bm93.htm>
- Jernbaneverket. (2013). *Sikkerhetshåndbok*. Hentet Mars 04, 2015 fra [www.jernbaneverket.no/PageFiles/28862/Jernbaneverkets%20sikkerhetsh%C3%A5ndbok%2004122013.pdf](http://www.jernbaneverket.no/PageFiles/28862/Jernbaneverkets%20sikkerhetsh%C3%A5ndbok%2004122013.pdf)
- Jernbaneverket. (2014, Februar 06). *JBV Bane Energi*. Hentet Mars 04, 2015 fra <http://www.jernbaneverket.no/PageFiles/29029/3.%20Presentasjon%20omformere%202014-2017%20-%20leverandørmarkedet%202014-02-06.pdf>
- Jernbaneverket. (2014). *Sikkerhet*. Hentet Mars 04, 2015 fra [www.jernbaneverket.no/no/Sikkerhet/](http://www.jernbaneverket.no/no/Sikkerhet/)
- Jernbaneverket. (2015 йил 29-Januar). *jernbaneverket.no*. From <http://www.jernbaneverket.no/no/Jernbanen/Miljo/>
- Jernbaneverket. (2015 йил 29-Januar). *jernbaneverket.no*. From Energiforbruk til togfremføring: [www.jernbaneverket.no/no/Jernbanen/Miljo/Miljopavirkning/Energiforbruk/](http://www.jernbaneverket.no/no/Jernbanen/Miljo/Miljopavirkning/Energiforbruk/)
- Jernbaneverket. (2015 йил 29-Januar). *jernbaneverket.no*. From Jernbanen i tall: [www.jernbaneverket.no/no/Jernbanen/Jernbanen-i-tall/](http://www.jernbaneverket.no/no/Jernbanen/Jernbanen-i-tall/)
- Jernbaneverket. (2015, Februar 12). *Nordlandsbanen*. Hentet Februar 18, 2015 fra <http://www.jernbaneverket.no/no/Nyheter/Togenes-punktlighet-og-regularitet/Punktlighetstiltak-og-vedlikeholdsoversikt-2014/Nordlandsbanen/>
- Jernbaneverket. (2015). *Sikkerhet i Jernbaneverket*. Hentet Mars 04, 2015 fra <http://www.jernbaneverket.no/PageFiles/29557/leverand%C3%B8rveileder%20sikkerhet.pdf>
- Kassa, E. G. (2014). *Jernbaneteknikk*, TBA4225 NTNU.
- Klinke, A., & Renn, O. (2002). *A new approach to risk evaluation and management*.
- Lie, Ø. (2013). Flirt-togene skaper effekt-trøbbel for jernbanen. *Teknisk Ukeblad*.
- Lo, C. (2013, Mai 13). *Hydrail and LNG: the future of railway propulsion?* Hentet Februar 11, 2015 fra <http://www.railway-technology.com/features/featurehydrail-lng-future-railway-propulsion-fuel/>
- Mearian, L. (2014, November 26). *Computerworld*. Hentet Mars 18, 2015 fra Hydrogen is explosive, but supply is a bigger issue for the nascent industry: <http://www.computerworld.com/article/2852323/heres-why-hydrogen-fueled-cars-arent-little-hindenburgs.html>
- Meteorologisk institutt. (2015). *eKlima*. Hentet Februar 11, 2015 fra [eklima.met.no](http://eklima.met.no)

- Nicolaisen, T. (2014). *Jernbanen - ambisjoner i nord?* Trondheim: Jernbaneverket.
- Norsk hydrogenforum. (2015). Hentet 02 11, 2015 fra [www.hydrogen.no/om-hydrogen/ofte-stilte-sporsmal/](http://www.hydrogen.no/om-hydrogen/ofte-stilte-sporsmal/)
- NSB. (2015). *Nordlandsbanen*. Hentet Mars 19, 2015 fra <https://www.nsb.no/reisemal/regionstrekninger/nordlandsbanen>
- NSB. (2015, Februar). *Rutetabell*. Hentet Februar 18, 2015 fra <https://www.nsb.no/rutetider/rutetabell?periodStartDate=&fromStation=Trondheim+S&toStation=Bod%C3%B8&departure=1&departureTimeFrom=&departureTimeTo=&returnTimeFrom=&returnTimeTo=>
- NSB bane. (1994). *Elektrifisering og modernisering av Nordlandsbanen*. NSB bane.
- Rausand, M. (2011). *Risk Assessment: Theory, Methods and Applications*. Wiley.
- Semelsberger, T. A., & Brooks, K. P. (2015). *Chemical hydrogen storage material property guidelines for*. Elsevier B.V.
- Standard Norge. (2010, November 01). Vedlikehold - Vedlikeholdsterminologi. *NS-EN-13306:2010*. Norge: Standard Norge.
- Stensvold, T. (2014, September 08). *Teknisk Ukeblad*. Hentet Mars 04, 2015 fra <http://www.tu.no/industri/2014/09/08/slik-blir-verdens-forste-bil--og-passasjerferge-pa-batteri>
- The Internatioal Consortium for Fire Safety, Health & The Enviroment. (2015). *Minnesota Department og Public Safety*. Hentet Mars 11, 2015 fra <https://dps.mn.gov/divisions/sfm/programs-services/Documents/Responder%20Safety/Alternative%20Fuels/FuelCellHydrogenFuelVehicleSafety.pdf>
- Thomassen, M., Møller-Holst, S., & Midtun, H. M. (2014). *Alternative drivstoffer og framdriftsteknologier*. SINTEF.
- tu.no. (2015, Mars 4). *tu.no*. Hentet fra Hydrogen på tog: [www.tu.no/bygg/2013/03/26/foreslar-hydrogentog-pa-nordlandsbanen](http://www.tu.no/bygg/2013/03/26/foreslar-hydrogentog-pa-nordlandsbanen)
- UIC. (2007, Juni). *First UIC Report on Railways and Biofuels (Final draft)*. Hentet Februar 04, 2015 fra [www.uic.org/spip.php?article1754](http://www.uic.org/spip.php?article1754)
- Wikander, J. A. (2015, Mars 4). Elektrifisering av Nordlandsbanen. (J. C. Karlsen, Intervjuer)