

TBA4853 - Punktlig og effektiv jernbane

Elektrifisering av Rørosbanen

Behov eller bortkastet?

Prosjektrapport



29. april 2015

Gruppe 2

Aleksander Gundersen

Einar Agnalt

Espen Fossen

Hans Kristian Henriksen

Hilde Hørthe Kamperud

Kim Repshus Fjeld

Landsbyledelse

Christoffer Østvik

Sammendrag

Rørosbanen er en av få jernbanestrekninger i Norge hvor det fortsatt går diesellokomotiv. Om Norge skal nå sine utslippsmål vil det være nødvendig å skifte ut denne teknologien. I denne oppgaven er det vurdert om alternative teknologier som LNG, brenselcelle eller batteri har en konkurransedyktig kostnad- og miljøprofil sammenliknet med å bygge ut kontaktledning. Det er hentet inn data for ulike teknologier, gjort beregninger, og simulert ulike alternativer på Rørosbanen. Dette gjorde det mulig å få ut resultater for både utslipp og kostnader. Resultatene viser at det er samfunnsøkonomisk lønnsomt å velge en annen teknologi enn kontaktledningsnett. For miljøets del viser resultatene at kontaktledning er svært bra, med batteri- og brenselcellealternativene like etter. Det har blitt klart at opphavet til strømmen for å lage hydrogen, lade batterier og drive tog på kontaktledning har stor innvirkning på resultatene. Resultatene avhenger altså av hvordan man definerer renheten til norsk strøm. Trafikkgrunlaget har også stor innvirkning på både kostnad og miljøprofil for alle alternativ. I løpet av arbeidet har det kommet frem at det er svært gunstig å kombinere alternativene med en ekstra energilagringseenhet i toget. Videre arbeid bør undersøke deelelektrifisering, de alternative teknologienes konsekvenser for lengden av togstammen og eventuell utfasing av kontaktledningsanlegget på resten av linjenettet. Det bør også utføres en usikkerhets- og sensitivitetsanalyse av antagelsene gjort i denne rapporten.

Forord

Gruppen vil takke Christoffer Østvik for hans hjelp i arbeidet, og ledelse av landsbyen. Hans hjelp til å skaffe kontakter og data har vært uvurderlig i arbeidet vårt. Vi vil også takke Johan Anton Wikander for hans innsikt i alle områder av Jernbanedrift i Norge, og villighet til å svare på alle tenkelige og utenkelige spørsmål.

Vi vil også takke Heidi Meyer Midtun og Tor Nicolaisen for at de tok seg tid til å møte oss og svare på spørsmål.

Gjennom intervju med Steffen Møller-Holst har gruppen fått informasjon om hydrogenløsninger, og en mulighet til å diskutere sine funn.

Paul Agnar Røvik har gitt verdifull innsikt i data fra TIOS som har gjort det mulig å si noe om forsinkelsestallene knyttet til kontaktledningsnettet.

Erlend Rehn har skaffet gruppa data om drivstofforbruk for godstransport, mens Mandic Verdran har skaffet data om drivstofforbruk for persontog.

Uten bidragene fra disse personene ville det ikke ha vært mulig å produsere denne rapporten.

Trondheim, 29. april 2015

Innhold

1	Problemstilling	1
2	Innledning	2
3	Forenklinger og antagelser	4
3.1	Generelt	4
3.2	Elektrifisering	5
3.3	EDLC	5
3.4	LNG med EDLC	5
3.5	Hydrogen med EDLC	5
3.6	Batteri med EDLC	5
4	Metode	6
5	Rørosbanen	8
6	Dagens situasjon - diesel	9
6.1	Introduksjon	9
6.2	Simulering av dieseltogsett	9
6.3	Kostnader	10
6.4	Miljø	11
6.5	Datablad	12
6.6	Fordeler og ulemper	12
7	Elektrifisering	13
7.1	Introduksjon	13
7.2	Simulering av elektrisk togsett	14
7.3	Kostnader	15
7.4	Miljø	18
7.5	Datablad	20
7.6	Fordeler og ulemper med KL	20

8	Energilagringseenheter med høy spesifikk effekt	21
8.1	Svinghjul	21
8.2	EDLC – Electro-chemical Double Layer Capacitors	21
9	Liquified Natural Gas	23
9.1	Introduksjon	23
9.2	Simulering av togsett med LNG og EDLC	25
9.3	Kostnader	26
9.4	Miljø	28
9.5	Datablad	29
9.6	Fordeler og ulemper med LNG	29
10	Hydrogen	31
10.1	Introduksjon	31
10.2	Simulering av togsett med hydrogen og EDLC	36
10.3	Kostnader	37
10.4	Miljø	39
10.5	Datablad	39
10.6	Fordeler og ulemper med hydrogen	40
11	Batteri	41
11.1	Introduksjon	41
11.2	Simulering av togsett med batteri og EDLC	43
11.3	Kostnader	44
11.4	Miljø	46
11.5	Datablad	47
11.6	Fordeler og ulemper med batteri	47
12	Resultater og sammenlikning	48
12.1	Innledning	48
12.2	Kostnader	48
12.3	Miljø	51
13	Diskusjon	54
13.1	Kostnader	54
13.2	Miljø	56
13.3	Samfunnsnytte	61
14	Konklusjon og videre arbeid	62
14.1	Konklusjon	62
14.2	Videre arbeid	63
A	Simulering	70
A.1	Matlabscript	70
A.2	Modell	70

B	Beregninger	73
B.1	Beregning av energibruk for godstog på KL	73
B.2	Beregning av energitap på Rørosbanen	73
B.3	Beregning av forsinkelser på Rørosbanen	73
B.4	Beregninger utslipp for produsert batteri	73
C	Kostnader - Elektrifisering Trønderbanen og Meråkerbanen	75
D	TIOS	77
E	Vedlikehold	78

Figurer

5.1	Høydeprofil av Rørosbanen	8
6.1	Skjematisk modell av drivlinje for dieseltog brukt i simulering	9
6.2	Energiflyt fra simulering for dieselalternativ	10
7.1	Skjematisk modell av drivlinje for elektrisk tog brukt i simulering	14
7.2	Energiflyt fra simulering for elektrisk alternativ	15
9.1	Forventet gassproduksjon frem til 2035	24
9.2	Skjematisk modell av drivlinje for LNG-tog med EDLC brukt i simulering	26
9.3	Energiflyt fra simulering for LNG med EDLC alternativ	26
9.4	Sammenlikning av utslipp og kostnad for diesel, LNG og LNG med EDLC, for persontog på Rørosbanen.	29
10.1	Prinsipp for elektrolyse	32
10.2	Prinsipp for brenselcelle	34
10.3	Aktuelle brenselceller for ulike kraftnivåer	34
10.4	Eksempel på lokomotivdesign for hydrogenlokomotiv	35
10.5	Skjematisk modell av drivlinje for hydrogentog med EDLC brukt i simu- lering	36
10.6	Energiflyt fra simulering for hydrogen med EDLC alternativ	37
11.1	Skjematisk modell av drivlinje for batteritog med EDLC brukt i simulering	43
11.2	Energiflyt fra simulering for batteri med EDLC alternativ	44
12.1	Totale CO ₂ -utslipp for de ulike alternativene	52
13.1	Kostnad for alternativene med ulike avvik	55
13.2	Kostnad for alternativene med ulike avvik 10 år frem i tid	56
13.3	CO ₂ -utslipp med dagens persontrafikk med ulike strømmikser	57
13.4	CO ₂ -utslipp med to ganger dagens persontrafikk med ulike strømmikser .	58
13.5	CO ₂ -utslipp med dagens persontrafikk, gitt fremtidige teknologiegenskaper	59
13.6	Energiforbruk med og uten EDLC	60
A.1	Illustrasjon av virkningsgrader benyttet i simulering	72

Tabeller

6.1	Oppsummering av kostnader for dieselalternativ	11
6.2	Datablad for dieselalternativ	12
7.1	Oppsummering av kostnader for elektrisk alternativ	18
7.2	Datablad for elektrisk alternativ	20
9.1	Oppsummering av kostnader for LNG med EDLC alternativ	28
9.2	Datablad for LNG med EDLC	29
10.1	Oppsummering av kostnader for hydrogen med EDLC alternativ	38
10.2	Datablad for hydrogen med EDLC alternativ	39
11.1	Oppsummering av kostnader for batteri med EDLC alternativ	46
11.2	Datablad for batteri med EDLC	47
12.1	Beregnet årlig pris for togsett	49
12.2	Energikostnader for ulike alternativer	49
12.3	Energikostnader inkludert avgifter	50
12.4	Vedlikeholdskostnader for ulike alternativer	50
12.5	Totalkostnader for de ulike alternativene	51
12.6	CO ₂ -utslipp for ulike alternativer	51
12.7	NO _X -utslipp for ulike alternativer	52

Kapittel 1

Problemstilling

Gruppen har for prosjektet valgt følgende problemstilling:

Utredningen av Trønder- og Meråkerbanen viser at kontaktledningsteknologi er kostbar, men miljøvennlig. Hvilke alternativer til elektrifisering av Rørosbanen har konkurransedyktig kostnads- og miljøprofil?

Problemstillingen lar gruppen utnytte sin tverrfaglighet gjennom å inkludere økonomi, miljø, energianalyser og samfunnsnytte. Gruppen har flere studenter innenfor miljø- og energifag og en økonomistudent. Bruk av datasimuleringer er relevant for gruppens datastudent, mens innovasjon og omstilling er nøkkelford for entrepenørskapsstudenten. Totalt sett har alle gruppas medlemmer utnyttet sin fagkunnskap, samtidig som alle har lært om fagfelt de til vanlig ikke arbeider med.

Kapittel 2

Innledning

Norge har klare politiske mål om å redusere utslipp av CO₂ gjennom Kyotoavtalen [1], og NO_X gjennom Gøteborgprotokollen [2]. I jernbanesammenheng har man lang erfaring med bruk av elektrisitet som energikilde, og elektrisk togfremføring betraktes som en miljøeffektiv transportmetode. Dette har ført til liten aksept for bruk av andre energikilder i togfremføring [3]. I dag gjenstår det elektrifisering av tre store jernbanelinjer; Nordlandsbanen, Trønder- og Meråkerbanen og Rørosbanen. På disse linjene kjøres det dieseltog, og elektrifisering blir sett på som det mest sannsynlige fremtidige alternativet [3]. Ved å erstatte dieseltog med elektrifisert bane hevdes det at man vil redusere CO₂-utslippet [4]. Det finnes imidlertid alternativer til diesel som ikke innebærer elektrifisering, og noen av disse teknologiene er nå i ferd med å bli modne [5].

Det er i oppgaven valgt å se på tre ulike alternativer til elektrifisering; hydrogen, naturgass (LNG) og batteri. Disse teknologiene er vurdert sammen med en superkondensator (EDLC).

For å begrense oppgavens omfang er det valgt å fokusere på Rørosbanen. Banen går mellom to sentrale punkter i det norske jernbanenettet, og er en viktig del av en parallellstrekning mellom Oslo og Trondheim. Den går også gjennom variert terreng og antas, til en viss grad, å være representativ for det norske banenettet.

I oppgaven er det gjort simuleringer av de alternative teknologiene i fremdrift av persontog på strekningen Hamar-Støren, se vedlegg A. Innenfor hver teknologi er det modellert ett aktuelt togsett som brukes i sammenlikninger gjennom hele prosjektoppgaven. Resultater fra simuleringen er justert med tanke på dagens kjente forbruk og brukt som sammenlikningsgrunnlag. Modellen er ikke nødvendigvis helt representativ for virkeligheten, men gir en pekepinn på fordeler og ulemper ved teknologier, og muliggjør sammenlikning på samme grunnlag.

Det er i oppgaven gjort en rekke kostnadsberegninger for utskiftning av dagens dieseldrift på Rørosbanen. Oppbygging av nødvendig infrastruktur og innkjøp av togsett utgjør en stor kostnad for Jernbaneverket og operatørene av linjen, men vil til syvende og sist være et spørsmål om samfunnsøkonomi. De økonomiske analysene som gjøres i denne rapporten illustrerer samfunnsnyttene ved de ulike alternative teknologiene.

I tillegg til kostnader er miljøaspektet ved de ulike løsningene analysert og diskutert.

Å redusere utslipp av klimagasser er sentralt i å hindre at de menneskeskapte klimaendringene fører til mer ekstremvær og ødeleggelser. Det vil være av stor samfunnsøkonomisk nytte å redusere disse utslippene, og dermed redusere risikoen for et mer uforutsigbart og ekstremt klima.

Kapittel 3

Forenklinger og antagelser

For å ha mulighet til å sammenlikne diesel og elektrifisering med alternative teknologier i togfremføring, er det gjort noen forenklinger og antakelser:

3.1 Generelt

1. Det antas at fremtidig togtrafikk på Rørosbanen både med tanke på person- og godstransport tilsvarer dagens situasjon.
2. Kostnaden for NSBs type 93 tog, er brukt som en grunnpris for alle teknologiene.
3. Det er tatt utgangspunkt i tekniske data til NSB type 93 motorvognsett i simuleringer og andre beregninger.
4. Ut fra rutetabellen er det antatt at det vil bli nødvendig med 8 persontog på Rørosbanen. I praksis går det 12 ulike motorvognsett på Rørosbanen, men mange av disse går videre utover banen, og utfra trafikkmengden er 8 tog antatt tilstrekkelig.
5. Med tanke på vedlikeholdskostnader er det antatt en grunnkostnad tilsvarende NSB's budsjett for 2014 for type 93 motorvognsett. De andre settene har blitt justert i forhold til denne kostnaden.
6. Det antas at et motorvognsett varer i 25 år for alle togtyper.
7. I simuleringene er det antatt en konstant virkningsgrad, uavhengig av belastning.
8. Utslipp i forbindelse med produksjon av motorvognsettet har ikke blitt vurdert.
9. For innkjøps- og vedlikeholdskostnader er det antatt 8 person- og 3 godstog på Rørosbanen.
10. Det blir ikke tatt hensyn til tomgangskjøring eller administrative forflytninger.

3.2 Elektrifisering

1. Det er tatt utgangspunkt i utredningen av elektrifisering av Trønder- og Meråkerbanen, gjennomført av Jernbaneverket, når det beregnes nyoppsettskostnader for elektrifisering av Rørosbanen. Her antas det at kilometerkostnaden for elektrifisering av Trønder- og Meråkerbanen er direkte overførbare til Rørosbanen. Det er antatt at vedlikeholdskostnader per kilometer for kontaktledningsnett (KL) på strekningen Trondheim-Støren er direkte overførbare til Rørosbanen.
2. Tap i overføring og omforming for Rørosbanen er antatt å være lik tapene i resten av landet. I tillegg antas det bygging av autotransformatorer (AT) i alle nye elektrifiseringsprosjekter.
3. 20% av den forbrukte energien vil kunne regenereres for godstog.
4. Det antas en lik forsinkelsesrate på Rørosbanen som i resten av landet, proposjonalt med forbrukt energimengde. I beregning av energimengde er det antatt at Type 93 har en gjennomsnittlig vekt.
5. Utslippsdata per kilometer fra utredningen av elektrifisering av Trønder- og Meråkerbanen er antatt å være direkte overførbare til Rørosbanen.

3.3 EDLC

1. Det er antatt at fremstillingen gir neglisjerbart miljøfotavtrykk.

3.4 LNG med EDLC

1. Det er antatt en utskiftning av både person- og godstog på Rørosbanen med nye LNG-tog.
2. Det er valgt å ikke benytte EDLC på godstog.

3.5 Hydrogen med EDLC

1. Det antas at godstrafikken på Rørosbanen fortsetter å bruke diesel som drivstoff. Et motorvognsett med hydrogen og EDLC benyttes til persontransport.

3.6 Batteri med EDLC

1. Tilsvarende hydrogenalternativet antas det her at diesel beholdes som drivstoff for godstransport på grunn av teknisk gjennomførbarhet. En løsning med batteri og EDLC benyttes til persontransport

Kapittel 4

Metode

Simulering av togfremføring på Rørosbanen er benyttet ofte i oppgaven for å gi data om energiforbruk og hvor tilført energi blir forbrukt. Det er modellert forskjellige motorvognsett med tanke på persontrafikk for å gi data for hver teknologi. Data matet inn i simuleringen er blant annet antatt vekt, effekt og virkningsgrad, samt data fra banen med høydekurver for å gi tilfredsstillende realisme. Simuleringen blir sett på som et tenkt motorvognsett tilsvarende det som kjører på Rørosbanen i dag. Se vedlegg A for mer informasjon om teknisk gjennomføring.

Informasjonen i denne prosjektoppgaven kommer fra gjennomførte intervjuer, søk i tekniske databaser, e-postkorrespondanse og søk i bøker og artikler. Det har blitt gjennomført intervjuer løpende når informasjon har vært nødvendig, og spesielt i starten, hvor man prøvde å skaffe seg en oversikt over oppgaven. Kostnadsestimater er ofte basert på informasjon fra produsenter og allerede gjennomførte økonomiske analyser. Miljømessige konsekvenser er ofte hentet fra livssyklusanalyser gjennomført av forskningsmiljøer.

Å sammenlikne kostnader er en utfordring, da noen kostnader er investeringskostnader og andre er årlig kostnader. Dessuten vil materiell og liknende investeringer ha ulik levetid. Det er derfor gjort forenklinger og valgt å skalere alle kostnader ned til en årlig verdi, for å lettere kunne sammenlikne alternativer opp mot hverandre. For eksempel er investeringskostnaden for kontaktledning (KL) på Rørosbanen ventet å være på omtrent 5 mrd. NOK. Dette tallet er beregnet med en levetid på 75 år. Her blir den årlige kostnaden for KL gitt ved:

$$\frac{5 \text{ mrd. NOK}}{75 \text{ år}} = 67 \text{ mill} \frac{\text{NOK}}{\text{år}} \quad (4.1)$$

Det er nå mulig å sammenlikne denne kostnaden med andre årlige kostnader. Alle kostnader er fremstilt i årlig verdi for motorvognsett og komponenter på Rørosbanen om ikke annet er oppgitt. I denne prosjektoppgaven er det ikke tatt hensyn til fremtidige kostnader og renter.

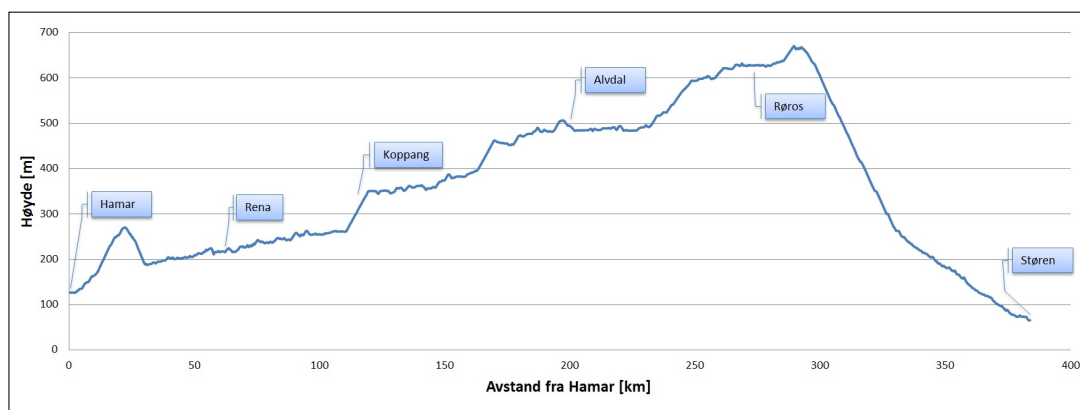
For miljødelen er det beregnet et årlig utslipp av miljøgasser. Her gjelder samme prinsipp som ved kostnadssammenlikningene. For alle alternative teknologier er det beregnet

et årlig utslipp av miljøgasser. For KL er utslippene beregnet som et engangsutslipp. Grunnen til dette er å lettere kunne sammenlikne alternativene.

Kapittel 5

Rørosbanen

Rørosbanen er 384 kilometer lang og strekker seg fra Hamar i sør til Støren i nord via Røros [6]. Strekningen går i hovedsak gjennom Østerdalen, langs Glomma, noe som gir en jevn høydestigning fra Hamar (139 moh.) til Røros (628 moh.). I følge NSBs rutetabell går det 36 persontog tur-retur i uken på strekningen Hamar-Røros, mens det er 20 avganger tur-retur Røros-Støren hver uke. Dette tilsvarer omtrent 10% av gjennomsnittlig trafikkmengde på andre jernbanelinjer i Norge. Det er tidligere vurdert om strekningen skal elektrifiseres som et ledd i oppgraderingen av jernbanenettet i Norge [7].



Figur 5.1: Høydeprofil av Rørosbanen

Kapittel 6

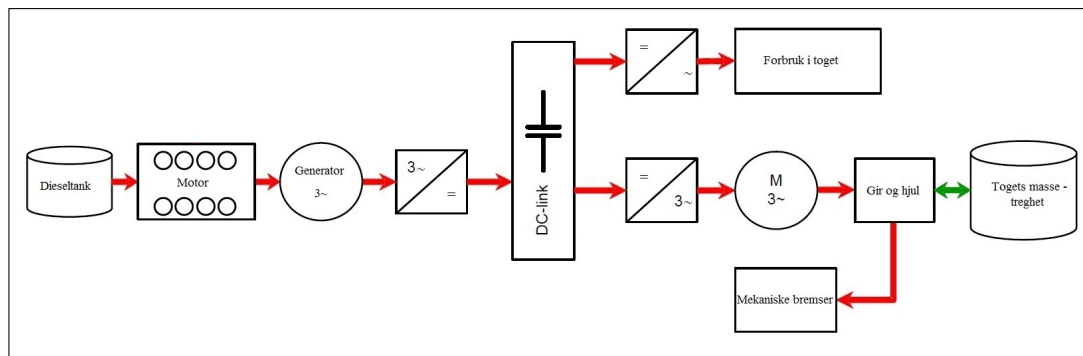
Dagens situasjon - diesel

6.1 Introduksjon

På Rørosbanen blir det i dag brukt diesel til fremføring av både person- og godstog. Med utgangspunkt i NSBs miljørapport er dieselforbruket på omtrent 1,28 mill. liter/år for persontrafikk [8]. Basert på tall fra CargoNet er forbruket omtrent 0,72 mill. liter/år for godstransport [9].

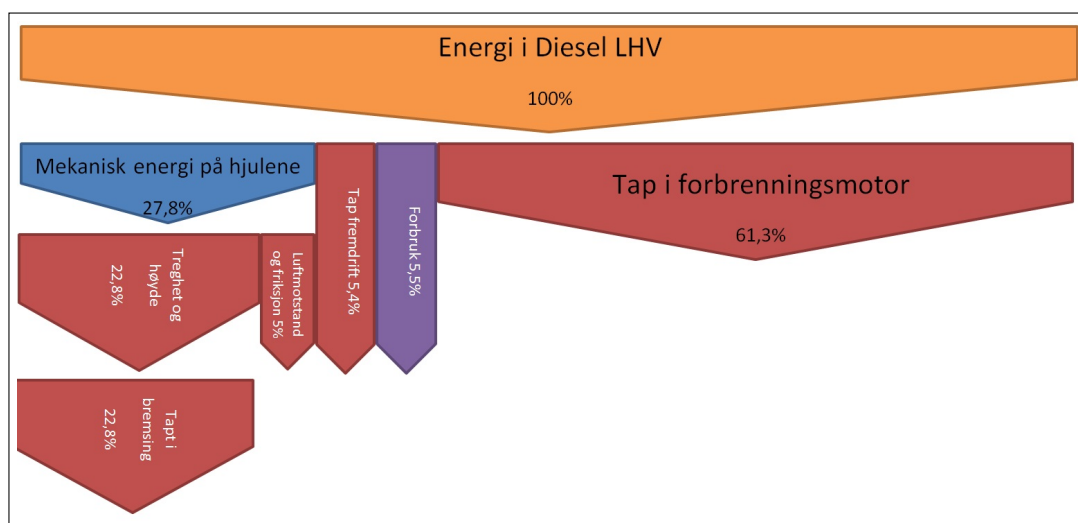
6.2 Simulering av dieseltogsett

For å verifisere det reelle forbruket på banen i forhold til simuleringen, ble dieseltog simulert. Grunnlaget for simuleringen er skjematisk vist i figur 6.1. Energi i dieseltog fra simuleringen vises i figur 6.2.



Figur 6.1: Skjematisk modell av drivlinje for dieseltog brukt i simulering

Det fremgår av figur 6.2 at det største tapet ved bruk av diesel, er forbrenningsmotoren (61,3%). Et annet interessant tall er tap i bremsing, da dette er potensialet for regenerering og vil kunne redusere dieselforbruket.



Figur 6.2: Energifyt fra simulering for dieselalternativ

Dieselforbruket fra simuleringen utgjorde 1,04 mill. liter/år for persontrafikk mellom Hamar og Støren. Dette er lavere enn estimerte tall fra NSB (se seksjon 6.1 og det ble derfor oppjustert med et forholdstall slik at tallene kom i overensstemmelse. De justerte verdiene vil bli brukt i resten av denne prosjektoppgaven. Dieselforbruket tilsvarer 3 478 tonn CO₂-ekvivalenter i forbrenningen og 52 tonn NO_x for persontog i simuleringen.

6.3 Kostnader

6.3.1 Investering motorvogn

Det antas en investering på 51,25 mill. NOK/togsett for persontog og 35 mill. NOK/togsett for godstog [10]¹, [11]². Begge togsettene har en estimert levetid på 25 år. Med utgangspunkt i dagens trafikk på Rørosbanen kan det antas at man trenger 8 persontog og 3 godstog. Dette gir en investeringskostnad på 515 mill. NOK.

6.3.2 Drivstoff

Det kan antas en dieselpriis på 8 NOK/liter [12] noe som gir en årlig kostnad på 10,2 mill. NOK knyttet til persontransport, og 5,8 mill. NOK knyttet til godstransport. Disse kostnadene inkluderer CO₂-avgift [13]. Norske avgifter for utslipp av NO_x er på 19,19 NOK/kg-NO_x [14]. NSB opererer med et NO_x-utslipp på omtrent 4 g/kWh i samsvar med Stage III B europeisk utslippsstandard [15], [8]. Dette antas å gi en årlig kostnad på 1,6 mill. NOK for både person- og godstransport på Rørosbanen.

¹Pris i 1998: 27 millioner, korrigerert med kpi = 2,5 %

²Pris i 2006: 30 millioner, korrigerert med kpi = 2,5 %

6.3.3 Vedlikehold

Tall for vedlikehold av togsett er hentet fra NSB. Det er gitt en pris i kr/km kjørt for persontogene som går på Rørosbanen [16]. Her er det antatt at tallene er overførbare til godstog proporsjonalt med energimengde brukt av godstog på strekningen. Dette vil gi en årlig vedlikeholdskostnad på 44,1 og 15,9 mill. NOK for person- og godstog.

6.3.4 Oppsummering kostnader

Dieselalternativ [mill. NOK/år]			
Beskrivelse	Person	Gods	Sum
Investeringskostnader			
- Togsett	16,4	4,2	20,6 ³
Årlige kostnader			
- Diesel	10,2	5,8	16,0
- NO _x -avgift	1,0	0,6	1,6
- Vedlikehold togsett	44,1	15,9	60,1
Sum kostnader	71,8	26,5	98,2

Tabell 6.1: Oppsummering av kostnader for dieselalternativ

6.4 Miljø

6.4.1 CO₂

Forbrenning av diesel i konvensjonell dieselmotor gir utslipp av gasser som for eksempel CO₂, CO, NO_x, SO₂ og partikler. En konvensjonell dieselmotor slipper ut 268 gCO₂/kWh levert energi [17]. Med utgangspunkt i simuleringen antas det et CO₂-utslipp på 3 478 tonn knyttet til persontrafikk. Relativt lite godstransport på Rørosbanen gir et årlig CO₂-utslipp på 1 940 tonn. Disse tallene er basert på utslipp ved forbrenning. Utslipp ved produksjon kan estimeres til 0,4 kg CO₂/liter diesel [18]. Dette fører til et utslipp på omtrent 3990 tonn knyttet til persontransport og omtrent 2228 tonn til godstransport. Det totale CO₂-utslippet blir dermed 6218 tonn årlig. Resultater fra simuleringen stemmer godt overens med tall fra "NSB Persontog Miljørapport 2013" [8].

6.4.2 NO_x

Som nevnt tidligere opererer NSB med et NO_x-utslipp på omtrent 4 g/kWh i samsvar med Stage III B europeisk utslippsstandard. Med utgangspunkt i simuleringen gir dette et årlig NO_x-utslipp på omtrent 51,7 tonn fra persontrafikken. Tilsvarende bidrar godstransport med omtrent 29,1 tonn NO_x årlig.

³Kostnader er fordelt på togsettets levetid - 25 år

6.4.3 Støy

Ved høy fart vil støy fra toget oppleves som lik for alle togalternativene. Ved lav fart vil derimot nærområdet kunne oppleve høyere støynivå knyttet til diesellokomotiver. Diesellokomotiver gir til dels lavfrekvent støy [19].

6.4.4 Partikler

Utslipp av partikler regnes som et alvorlig problem ved forbrenning av diesel. Partiklene har en størrelse tilsvarende en femtedel av tykkelsen til et hårstrå, og er dermed små nok til å komme ned i lungene. Ved å puste eksos, bidrar partiklene i diesel til 70% av risikoen for lungekreft i følge en evaluering utført av Office of Environmental Health Hazard Assessment. Det er også påvist sammenheng med andre plager som allergi, astma og kroniske luftveissykdommer [20].

6.5 Datablad

Datablad for dieselalternativ			
Beskrivelse	Person	Gods	Sum
Vekt togsett [tonn]	80,0	- ⁴	-
Energibruk [GWh/år]	12,9	7,3	20,2
CO ₂ -utslipp inkl. produksjon [tonn/år]	3990	2228	6218
NO _X -utslipp [tonn/år]	51,7	29,1	181,8
Sum kostnader [mill. NOK/år]	71,8	26,5	98,2

Tabell 6.2: Datablad for dieselalternativ

6.6 Fordeler og ulemper

Den største fordelen med dieselteknologien er at den er godt utprøvd og har god tilgjengelighet i markedet. Dette fører til høy pålitelighet og konkurransedyktige priser. En ulempe ved dieselmotorer er høyt støynivå. I tillegg fører diesel til store miljøkonsekvenser både lokalt og globalt. Diesel er den eneste togfremføringsteknologien i våre sammenligninger som har et målbart utslipp av SO₂ og partikler. Dette, sammen med høyt utslipp av CO₂, fører til at løsningen ikke regnes som bærekraftig på lengre sikt.

⁴Da vekten til et godstog hovedsakelig vil bestemmes av godset, vil denne variere sterkt

Kapittel 7

Elektrifisering

7.1 Introduksjon

Elektrisk drift av tog gir mulighet for lette og sterke konstruksjoner med god akselerasjon, og store fordeler knyttet til drift og vedlikehold. Sammenliknet med å ha energienheten ombord, som ved dieseldrift, vil vekten bli betydelig lavere. Det gir færre komponenter som trenger vedlikehold og få bevegelige deler. Ved bremsing vil moderne tog bruke motorene som generatorer og mate strøm tilbake til nettet. Dette er spesielt fordelaktig i Norge med lange utforkjøringer i variert terreng. Andelen av energi tilført toget som blir tilbakeført i Norge er typisk i størrelsesorden 10-20% [21]. Av energien som tilføres toget, vil typisk 30-40% bli omgjort til kinetisk energi [22]. Dersom det i tillegg tas med energi brukt i stigninger, vil man i Norge ha potensiale til å regenerere opp mot 40% av tilført energi.

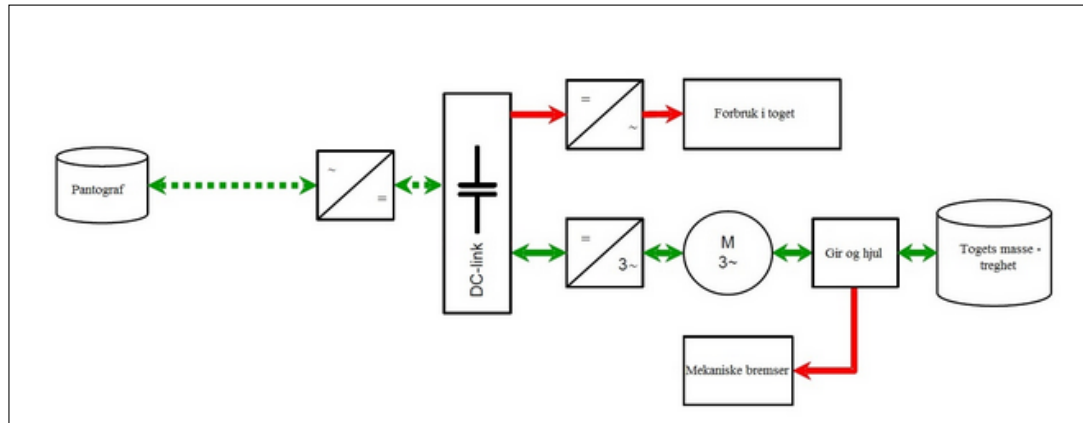
Elektrifisering av Rørosbanen vil medføre store kostnader og miljøbelastninger. I estimeringen av disse er det tatt utgangspunkt i utredningen av elektrifisering av Trønder- og Meråkerbanen, og eksisterende elektriske baner. Tallene sees på som detaljerte og pålitelige for de respektive banene. Det vil derimot være stor usikkerhet knyttet til overføringen til Rørosbanen. Estimaten blir uansett tatt med for å gi et generelt bilde på hvilke kostnader elektrifisering kan medføre.

7.1.1 Elektrifisering i Norge

Den første elektrifiserte jernbanen i Norge var Thamshavnbanen som ble bygget allerede i 1908 [23]. Etter dette har flere jernbanestrekninger blitt elektrifisert, hvor den siste i rekken er Arendalsbanen, ferdigstilt i 1996. For fremdrift av tog i Norge brukes enfaset vekselstrøm på omtrent 16 kV og $16 \frac{2}{3}$ Hz. Dette betyr at strømmen må omformes fra 50 Hz, som er standard på el-nettet i Norge. Det er de enkelte matestasjonene langs strekningen som tar strømmen fra energiselskapenes el-nett, og deretter omformer og fordeler strømmen ut på kontaktledningsnettet (KL). Matestasjonene er en viktig del av KL, da antallet og størrelsen på disse er med på å bestemme kapasiteten på den enkelte strekningen. [24]

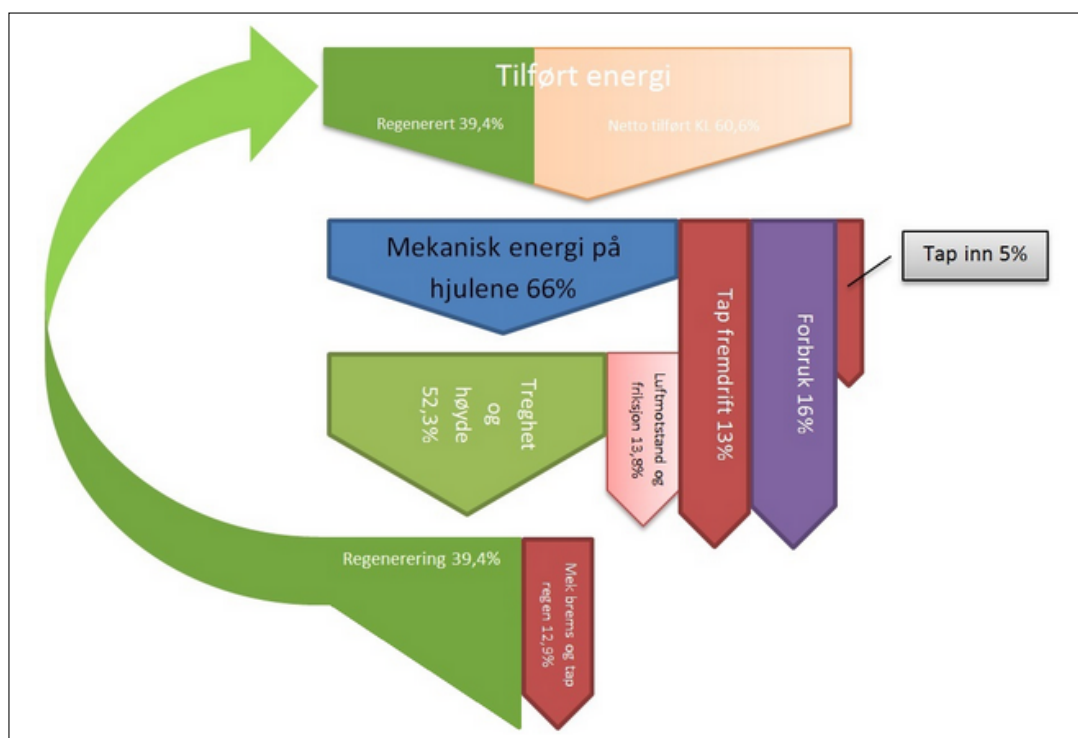
7.2 Simulering av elektrisk togsett

Modell for simuleringen er vist i figur 7.1. Energien fra KL overføres gjennom pantograf og inn i kraftelektronikken i toget. Herfra distribueres energien til forbruk og fremdrift. Ved regenerering er samme vei brukt tilbake til nettet.



Figur 7.1: Skjematisk modell av drivlinje for elektrisk tog brukt i simulering

Figur 7.2 viser hvor den tilførte energien til toget blir omsatt. Simulert modell har stor andel av energien omsatt på hjulene, og gir dermed stort utbytte av regenerering. Elektriske tog har svært god virkningsgrad sammenliknet med for eksempel diesel.



Figur 7.2: Energifyt fra simulering for elektrisk alternativ

7.3 Kostnader

7.3.1 Elektrifisering

Det er stor usikkerhet knyttet til kostnader ved elektrifisering av jernbane. Nye tall fra Jernbaneverket viser at elektrifisering av Trønder- og Meråkerbanen har en kostnadsramme på 2,6 mrd. NOK eller rundt 13 mill. NOK per kilometer, se vedlegg C. Dette tallet inkluderer alle kostnader knyttet til utbyggingen. Andre rapporter om temaet elektrifisering er mer optimistiske. En rapport fra Jernbaneverket og Civitas [25] anslår 4,5 mill. NOK per kilometer for elektrifisering av alle strekninger i Norge. Teknisk Ukeblad oppgir derimot en elektrifiseringskostnad på mellom 15 og 20 mill. NOK per kilometer på Nordlandsbanen [5].

Av de nevnte kostnadsoverslagene vurderes Trønder- og Meråkerbanen som det mest grundige og realistiske, da dette er et dagsaktuelt prosjekt som er i ferd med å bli iverksatt. Dessuten er banen relativt lang, omtrent 200 km, noe som gjør at kilometerprisen kan antas å være relevant for andre jernbanestrekninger. Ved å benytte denne kilometerkostnaden på den 384 km lange strekningen Hamar-Støren, vil dette gi en investeringskostnad på omtrent 5 mrd. NOK, se vedlegg C.

Det er ikke uproblematisk å overføre disse tallene til Rørosbanen, da beregnings-

grunnlaget vil være unikt for hver enkelt bane. Faktorer som kan gi store utslag på pris kan være store sprenninger, heving av bruer og underganger, endring av tunneler, tilgang på elektrisitet og detaljnivå på utredningen.

7.3.2 Investering togsett

Det er antatt samme investering for elektriske togsett som diesel. Som nevnt i seksjon 6.3.1 er denne kostnaden totalt 515 mill. NOK.

7.3.3 Drivstoff

Ifølge Jernbaneverket brukes det årlig omtrent 622 GWh elektrisk energi til togfremføring hvis man tar med tap i omforming og overføring [26]. I 2013 gav dette en total kostnad på 297 mill.NOK [27]. Dette tallet inkluderer både kostnad for elektrisk energi og nettleie. Prisen Jernbaneverket betaler for elektrisiteten blir derfor 48 øre/kWh.

Ved å ta utgangspunkt i tallene over og simulering av persontog, samt dielselbruk for godstransport på Rørosbanen, kan man beregne det elektriske forbruket på strekningen. For godstog inneholder utregningene energiinnholdet til diesel, virkningsgraden til dieselmotorer, og virkningsgraden til elektriske godstog samt en antatt regenerering på 20% [21]. Med utgangspunkt i disse variablene, vil det være nødvendig å kjøpe inn energi slik at man har omtrent 5,3 GWh tilgjengelig for togfremføring per år, se vedlegg B Med dette forbruket og denne energiprisen, vil det bli en årlig kostnad på omtrent 2,8 mill. NOK for energien togsettene bruker.

7.3.4 Energitap

Som nevnt kjøper Jernbaneverket årlig inn omtrent 622 GWh elektrisk energi til togfremføring, inkludert tap. Dagens teknologi gir et årlig energitap på 120 GWh, hvor 90 GWh skyldes omforming og 30 GWh skyldes overføring [28]. Energitapet tilsvarer omtrent 20% av innkjøpt energi [26]. Et tiltak som kan gjøres for å begrense dette energitapet, er investering i autotransformatoranlegg (AT). Dette fører til en halvering av energitapet i omforming. Det er vedtatt at AT skal tas i bruk ved utbygging og fornying av alle elektrifiserte jernbanestrekninger. Med et slikt anlegg kan man øke avstanden mellom omformere med 40 km, noe som gjør at man trenger færre omformerstasjoner, som igjen fører til mindre energitap og lavere kostnader. Ved en utbygging med AT vil det totale energitapet ligge på 12% [26]. Om man tar utgangspunkt i en energipris på 48 øre/kWh, og simuleringen, vil den årlige kostnaden for tapt energi være omtrent 0,3 mill. NOK per år.

7.3.5 Forsinkelser

I følge forsinkelsesdata fra TIOS er det knyttet mange forsinkelser som utelukkende skyldes KL. I 2014 førte feil med elkraft og KL til 1473,5 forsinkelsestimer i Norge, se vedlegg D. Om man antar at disse timene kan fordeles likt basert på dagens trafikk, vil en eventuell utbygging på Rørosbanen kunne gi omtrent 15 forsinkelsestimer per

år (se vedlegg B), mulig noe mindre grunnet lite kompleks trafikk på Rørosbanen. En forsinkelsestid utgjør ifølge Jernbaneverket [29] i gjennomsnitt omtrent 50 000 NOK per time. Kostnadene for forsinkelser på Rørosbanen vil derfor ligge på omtrent 0,5 mill. NOK årlig.

Forsinkelser grunnet vedlikehold registreres som regel under en annen kode i TIOS, da disse forsinkelsene er planlagte. Det har vist seg vanskelig å skille de forsinkelser som er forårsaket av planlagt vedlikehold på KL-nettet, fra andre forsinkelser grunnet planlagt vedlikehold på selve banen. Det er heller ikke tatt høyde for innstillinger på strekningen, da det er vanskelig å finne kostnader knyttet til dette. Ut i fra beregninger av trafikkmengde på strekningen, kan man anta rundt 8 innstillinger per år. Dette er ikke overførbart til Rørosbanen da denne strekningen har en lav trafikkbetlastning og et lite komplekst trafikkbilde. Derfor er det antatt at denne kostnaden er neglisjerbar.

7.3.6 Vedlikehold togsett

For vedlikehold av togsett drevet av KL er det tatt utgangspunkt i kostnad for dieseltog, se seksjon 6.3.3. En studie gjort i Canada har beregnet at det å vedlikeholde togsett drevet av KL er 16% billigere enn diesel [30]. Total vedlikeholdskostnad blir da estimert til 37,1 og 13,4 mill. NOK for henholdsvis person- og godstog på Rørosbanen. Dette er også i overensstemmelse med en studie fra 2001 fra École Polytechnique Fédérale De Lausanne [31].

7.3.7 Drift og vedlikehold infrastruktur

Tall fra Jernbaneverket knyttet til vedlikehold av KL på strekningen Støren-Trondheim, viser en gjennomsnittlig årlig kostnad på omtrent 6,5 mill. NOK, se vedlegg E. Ifølge Jernbaneverket [32] er dette et tall som er representativt for de fleste strekninger nord for Lillehammer. Sør for Lillehammer vil dette tallet være noe høyere grunnet større belastning på jernbanenettet. Strekningen Støren-Trondheim er omtrent 52 kilometer lang, og dette gjør at den årlige vedlikeholdskostnaden på en eventuelt elektrifisert Rørosbane kan beregnes til omtrent 48 mill. NOK, se vedlegg E.

7.3.8 Oppsummering kostnader

Elektrisk alternativ [mill. NOK/år]			
Beskrivelse	Person	Gods	Sum
Investeringskostnader			
- Nyoppsett infrastruktur			66,6 ¹
- Togsett	16,4	4,2	20,6 ²
Årlige kostnader			
- Energi (ink. tap)	1,3	1,5	2,8
- Forsinkelser	0,5	0,0	0,5
- Vedlikehold togsett	37,1	13,4	50,5
- Drift og vedlikehold, infrastruktur			48,0
Sum kostnader			189,0

Tabell 7.1: Oppsummering av kostnader for elektrisk alternativ

7.4 Miljø

7.4.1 Introduksjon

Det er krevende å beregne de nøyaktige miljømessige kostnadene ved utbygging av KL. Jernbaneverket har ikke før i den senere tid vurdert dette, og en av de første reelle analysene er i forbindelse med elektrifisering av Trønder- og Meråkerbanen [32]. I den forbindelse utarbeidet Norconsult en rapport for miljøprogrammet på banen og et miljøbudsjett for elektrifisering. Det finnes ingen egen utredning for Rørosbanen på dette feltet. Det vil derfor bli antatt en liknende miljøprofil som Trønder- og Meråkerbanen.

Master til KL og transformatorer har en relativt jevn fordeling på jernbanelinjen, og settes opp med omtrent 55-60 meters avstand på rette strekninger. Gitt at den horisontale kurvaturen på andre linjer er sammenliknbar, bør tall fra Trønder- og Meråkerbanen være overførbare til Rørosbanen. Transformatorer kan dekke omtrent 10 km linje. Gitt at tilsvarende infrastruktur ikke finnes i området fra før, vil dette også være en relativt enkel beregning. Omformerstasjoner er vanskeligere å anslå, da det ikke oppgis rekkevidde for disse. Det faktum at man kun planlegger å bygge 2 stk. på omtrent 200 km linje tilsier imidlertid at behovet for mange omformerstasjoner neppe er svært høyt. [33]

Totalt anslår Jernbaneverket at det vil bli sluppet ut omtrent 25 000 tonn CO₂-ekvivalenter i forbindelse med bygging og vedlikehold av KL på Trønder- og Meråkerbanen. Dette er beregnet over en levetid på 75 år, noe som gir et utslipp på 1610 kg CO₂ ekvivalenter per kilometer per år [33]. Overføres disse tallene til Rørosbanen, vil man kunne anta et utslipp på 618 tonn CO₂ per år, altså totalt omtrent 47 000 tonn over en 75 års periode. Det er antatt neglisjerbart NO_x-utslipp i forbindelse med utbygging av KL og produksjon av elektrisitet [34]. Det antas nordisk kraftmiks for energi som tilføres KL-

¹Kostnader er fordelt på anleggets levetid - 75 år

²Kostnader er fordelt på togsettets levetid - 25 år

anlegget. Dette fører til et CO₂-utslipp på 525 tonn for person- og 585 tonn for godstog per år utifra simulering.

7.4.2 Utslipp knyttet til energibruk

I Norge produseres 99% av all energi fra vannkraft [35]. Mange mener derfor at man kan se på norsk strøm som utslippsfri. Dette er det delte meninger om, da Norge har mange elektriske forbindelser til Skandinavia og Nederland [36]. Norge utnytter store deler av sitt vannkraftpotensiale uavhengig av norsk forbruk. Vannkraft som brukes for å drive tog i Norge, vil i praksis derfor måtte kompenseres for med annen energi fra enten Norge eller andre land i Europa/Asia. Det er kan derfor hevdes at summen av verdens energiproduksjon ikke nødvendigvis blir grønnere av at Norge kjører tog på elektrisk strøm. Som et kompromiss er det brukt nordisk strømmiks ved beregning av utslipp. Dette gjelder også lading av batteri og produksjon av hydrogen.

7.4.3 Viktigste bidrag til utslipp ved nyoppsett av KL

Tilvirkning av stål og kobber til omformere, transformatorer og master står for hoveddelen av den totale miljøpåvirkningen knyttet til elektrifisering [37]. Med dette som bakgrunn anbefales det at man fokuserer arbeidet på å optimalisere plassering av omformerstasjoner, benytter master som består av minst mulig stål, eventuelt resirkulert stål, og at man maksimerer avstand mellom master. På strekningenene som er omfattet av rapporten forventer man å måtte sette opp to omformerstasjoner, i tillegg til en transformator omtrent hver 10. km, totalt 20-23 stk. [33].

7.4.4 Annen miljøpåvirkning

I tillegg til direkte CO₂-utslipp til atmosfæren vil det være flere lokale miljøkonsekvenser av å bygge ut KL. Det er mange steder nødvendig å bygge adkomstveier for å komme frem med utstyr eller maskiner, og man må fjerne større mengder fjell og lignende for å sette opp KL. Stolpene og ledningene utgjør en fare for dyrene som lever i området. For fugl kan KL være et hinder, mens stolpene generelt vil være et forstyrrende element for dyr i nærmiljøet. Bygging av adkomstveier kan også ødelegge det lokale økosystemet, og virke avskrekkende på dyr. Det er svært vanskelig å si noe om omfanget av denne typen miljøpåvirkning, og enda vanskeligere å si noe om kostnaden av dette i kroner. Dette må i stedet være noe man tar med seg som et ankepunkt ved å bygge ut KL.

7.5 Datablad

Datablad for elektrisk alternativ			
Beskrivelse	Person	Gods	Sum
Vekt [tonn]	65,0	-	-
Energibruk [GWh/år]	2,5	2,6	5,1
CO ₂ -utslipp (nordisk mix) [tonn/år] ³	525	585	1110
NO _x -utslipp [tonn/år]	0,0	0,0	0,0
Sum kostnader [mill. NOK/år]			189,0

Tabell 7.2: Datablad for elektrisk alternativ

7.6 Fordeler og ulemper med KL

7.6.1 Fordeler

KL gjør toget til en av de mest miljøvennlige transportmidlene tilgjengelig selv om man legger nordisk strømmiks til grunn. Et KL-nett fører i tillegg til lite lokale forurensninger som NO_x og svevestøv, da et slikt system ikke bruker forbrenningsmotor. Tilbakeføring av strøm ved nedbremsing blir også benyttet av elektriske tog, noe som fører til høyere virkningsgrad. Elektrisk togfremføring er i tillegg en godt utviklet teknologi i Norge og kompetansen rundt fagfeltet er stor. Som nevnt tidligere krever elektriske tog i mindre grad vedlikehold enn alternative togteknologier. Dette hovedsaklig grunnet teknisk enklere systemer [26].

7.6.2 Ulemper

Dagens KL er en omfattende konstruksjon. Det omfatter ikke bare master og ledninger, men også transformatorer, omformere og annen infrastruktur. Dette må bygges og vedlikeholdes, og øker sårbarheten ved naturkatastrofer og tilsiktede angrep. Et KL-anlegg har større sannsynlighet for å skape forsinkelser enn jernbane uten elektrifisering, da det introduseres mange nye komponenter det kan oppstå feil ved. En annen konsekvens av elektrifisert jernbane er at den har en tydeligere visuell profil i landskapet.

³Dette inkluderer ikke CO₂-utslipp knyttet til utbygging av KL

Kapittel 8

Energilagringssystemer med høy spesifikk effekt

Ved akselerasjon eller retardasjon av et togsett, vil det bli omgjort mye energi på kort tid. Denne høye effekten er det bare behov for i korte perioder, og det er ikke hensiktsmessig å dimensjonere brenselcelle, batteri eller motor for dette effektbehovet hverken økonomisk eller med tanke på vekt. Derfor er det aktuelt å kombinere disse teknologiene med en energilagringssystem med høy spesifikk effekt. Samtidig kan energi som ellers ville gått tapt ved nedbremsing regenereres. Ved å ta i bruk energilagringssystem med høy spesifikk effekt i togfremføring vil man kunne operere drivsystemet nærmere den nominelle effekten, og derfor oppnå høyere virkningsgrad [38].

8.1 Svinghjul

En aktuell teknologi for å bevare energi er svinghjul. Energien lagret i hjulet er proporsjonal med massen av hjulet, og med kvadratet av både hastighet og radius. Et svinghjul er en sylinderformet masse, enten hul eller disk, som roterer med en hastighet på opp mot 100 000 runder i minuttet. Moderne svinghjul akselereres når det er overskudd av elektrisk energi. Dersom energien skal brukes, hentes det fra hjulet ved å generere elektrisk energi, akkurat som en rotor i en generator. Skulle noe gå galt og all dets energi bli frigjort kan dette få katastrofale konsekvenser [39].

Svinghjul er ikke mye utprøvd i togsammenheng, og sikkerheten rundt denne teknologien er foreløpig ikke tilfredsstillende. I denne oppgaven er det derfor valgt å se bort fra svinghjul med tanke på regenerering.

8.2 EDLC – Electro-chemical Double Layer Capacitors

8.2.1 Introduksjon

I en kondensator lagres energi ved å flytte elektroner fra en metallplate til en annen parallell metallplate. Ladningsforskjellen mellom de to platene setter opp et potensiale

som man kan bruke i en tilknyttet elektrisk krets. Hastigheten man kan lade/utlade en kondensator er begrenset bare av hvor mye varme elektrodene tåler, dvs. at en kondensator kan lades/utlades svært hurtig. En kondensator har en mye lavere spesifikk energi enn et batteri, og er derfor ikke tilstrekkelig for bruk i tog.

8.2.2 EDLC

En EDLC er en kondensator med et karbonlag på hver av de to parallelle platene. Dette laget, i kombinasjon med en passende elektrolytt, gjør at det er mulig å danne et dobbelt lag med ladninger per plate. Dobbelt så mye ladning gjør at den spesifikke energien øker kraftig sammenliknet med en vanlig kondensator. Den spesifikke energien i en EDLC kan ligge opp mot 15 Wh/kg. Dette er ikke spesielt høyt sammenliknet med for eksempel batterier eller brenselceller. Derimot gjør den høye spesifikke effekten, opp mot 5 000 W/kg, at en EDLC er ideell for å ta opp eller avgi mye energi på kort tid. I denne oppgave er det valgt en EDLC med en vekt på 1 tonn, spesifikk effekt på 1000 W/kg og en spesifikk energi på 10 Wh/kg [40] [41].

8.2.3 Kostnader

Ifølge rapporten “Energy storage systems cost update: A study for the DoE energy storage systems program” [42] fra 2011, har EDLC en pris på 80 000 kr/kWh. Det er god grunn til å anta at prisen for EDLC har blitt lavere siden den gang [43], men dersom man bruker denne prisen vil det være et grovt estimat. På Rørosbanen går det 8 tog, og hvert tog vil ut fra de gitte beregninger og antakelser behøve en EDLC på 10 kWh. EDLC-kostnaden for disse vil da bli 6,4 mill. NOK. Siden EDLC kan ha såpass mange sykluser er levetiden satt til 75 år.

Dersom man bruker EDLC i tog, vil det komme en tilleggs kostnad knyttet til kraftelektronikken mellom EDLCen og DC-busen, se figur 9.2. Fordi dette må dimensjoneres for en svært høy effekt og den ulike spenningen mellom DC-bus og EDLC, vil kostnaden bli betydelig. Typen omformer som behøves er en “step-up DC-DC converter”. I denne oppgaven er det valgt en omformer på 2 MW og kostnaden for denne var på omtrent 450 000 NOK i 2014 [44]. Omformerkostnaden tilsvarer omtrent 3,7 mill. NOK for alle 8 persontogene som går på Rørosbanen. Det er viktig å merke seg at dette er en kostnad som vil gjenta seg hvert 25. år, da dette er den antatte levetiden til komponenten.

8.2.4 Miljø

Det er knyttet noe CO₂-utslipp til produksjon av både omformer og EDLC, men levetiden er høy og det antas derfor at CO₂-utslippene kan neglisjeres.

Kapittel 9

Liquified Natural Gas

9.1 Introduksjon

9.1.1 LNG

Liquified Natural Gas (LNG) er en nedkjølt og komprimert form for naturgass. Når gassen kjøles ned til omtrent -163°C , vil den bli flytende og volumet avtar med en faktor på omtrent 600. Gass tar stor plass og fraktes mest hensiktsmessig i rør. Over lange avstander eller til bruk i kjøretøy, er dette en utfordring. Ved å gjøre gassen om til væske, vil den kunne transporteres og lagres i tanker. For å benytte LNG i forbrenning, må den fordampes tilbake til gassform.

9.1.2 Teknisk

Naturgass har vært på markedet i flere tiår, og det finnes godt utprøvd teknologi i forbindelse med LNG. Naturgass kjølt ned til -163°C er flytende og vil koke kontinuerlig ved oppbevaring. Gassen som da avgis må forbrukes, fordi den hovedsaklig inneholder metan, en av de verste klimagassene. Godt isolerte tanker krever også større plass, og sammen med lav energitetthet i LNG gir dette totalt et stort plassbehov.

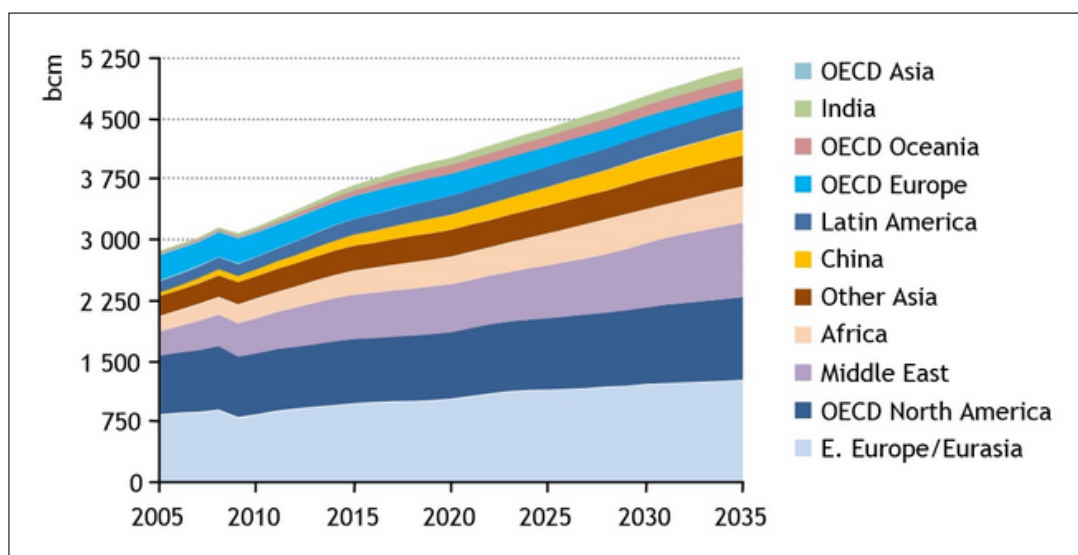
Det er flere måter å bruke LNG som drivstoff i motorvognsett. Eksisterende dieselmotorer kan uten store endringer tilpasses til å kjøre med inntil 80% naturgass sammen med diesel som f.eks. GEs retrofit kit [45]. Dette gir god fleksibilitet med tanke på tilgjengelighet av drivstoff og bedre rekkevidde. Imidlertid krever det at lokomotivet må trekke med seg en ekstra tankvogn for LNG som da vil gjøre toget lengre. En annen utfordring er at gassen kan forhåndsantennes av den varme sylindren. Dette kan bedres ved å senke kompresjonsforholdet og øke andelen gass, men det går da utover egenskapene ved ren dieseldrift. Andre metoder innebærer gnisttenning som i bensinmotorer, og kan da kjøres med ren gass. Dette gir gode muligheter for optimalisering av gassdrift og gir de reneste motorene.

Virkningsgraden for rene LNG-motorer med størrelse 1500 kW i skipsbransjen kan være i størrelsesorden 50% [46]. Dette vil være sammenliknbart med diesel ved liknende nominell effekt.

Naturgass er lettere enn luft og stiger derfor opp, noe som kan være positivt for eksplosjonsfaren ved en eventuell lekkasje. Gassen lukter ikke, er fargeløs og er ikke giftig. Naturgass kan antenne ved relativt høy temperatur, 540°C, forutsatt at blandingsforholdet med luft ligger mellom 4,7-14,7% naturgass [47].

9.1.3 Sammensetning og tilgjengelighet

Naturgass som selges i markedet i dag består hovedsakelig av metangass. Ubehandlet gass fra feltene inneholder flere tunge komponenter som blir skilt ut og solgt som eget produkt eller i blandinger. Tilgang på naturgass spås å være god i mange år framover. Det driftes store felter, oppdages nye, og utvinning av skifer-gass i USA sammen med forbedret teknologi, gjør denne energiformen konkurransedyktig på pris. Diagrammet under viser forventet produksjon av gass frem til 2035, utarbeidet av International Energy Agency [48].



Figur 9.1: Forventet gassproduksjon frem til 2035 [49]

Gass som drivstoff for tog er ingen nyhet. Allerede midt på 1900-tallet ble det eksperimentert med gassturbiner, mens mot slutten av 1980-tallet begynte Union Pacific og BNSF å se på konsepter med gass som drivstoff [50]. Selv om flere prosjekter har blitt gjennomført, har det tidligere vært moderat interesse grunnet tilgjengelighet og pris på gass i forhold til diesel. I 2012-2013 ble det gjennomført et pilotprogram i Canada av Canadian National Railway (CN) hvor LNG-lokomotiver ble testet på en 480 km strekning mellom Edmonton og Fort McMurray. Direktør for CN uttalte at målet med forskningen var å skaffe innledende informasjon om langsiktige muligheter for LNG.

”CN continues to work with other parties, including specialized manufacturers, locomotive builders, fuel suppliers and regulatory agencies on a project

to develop a state-of-the art natural gas railway engine for locomotives and a standardized railway fuel tender” [51]

Ulike LNG alternativer er testet ut rundt om i verden, blant annet rene gassmotorer og motorer med kombinasjon av både diesel og gass. I skipsbransjen har LNG blitt benyttet siden 2000 og er i stor utvikling. Blant annet Rolls Royce tilbyr motorer for ren gassdrift med gode utslippstall [52].

9.1.4 Forskning

Interessen for LNG i jernbanesammenheng er økende, mye grunnet dagens gunstige pris i forhold til diesel, positiv effekt i miljøsammenheng, samt gode resultater fra skipsbransjen. Dette har ført til økt forskning på LNG som drivstoff på jernbane. General Electric (GE) er ett av selskapene som jobber med prototyper designet for å bruke både LNG og diesel. Selv om utviklingen av nye lokomotiver pågår, tilbyr GE et ombyggningssett til eksisterende Evolution Series lokomotiver. Dette gir mulighet for å erstatte inntil 80% av diesel med naturgass, for økt rekkevidde og reduserte drivstoffkostnader. [45]

I Norge har Norsk Gassforum fått tilskudd til prosjektet “LNG som drivstoff på jernbane” der de skal belyse miljømessige og økonomiske konsekvenser av å bruke LNG på ikke-elektrifiserte jernbaner. Prosjektet vil ta utgangspunkt i Nordlandsbanen, og vil se på mulighetene for å forbedre klimaregnskapet uten omfattende investering i elektrifisering. [53]

9.1.5 Infrastruktur

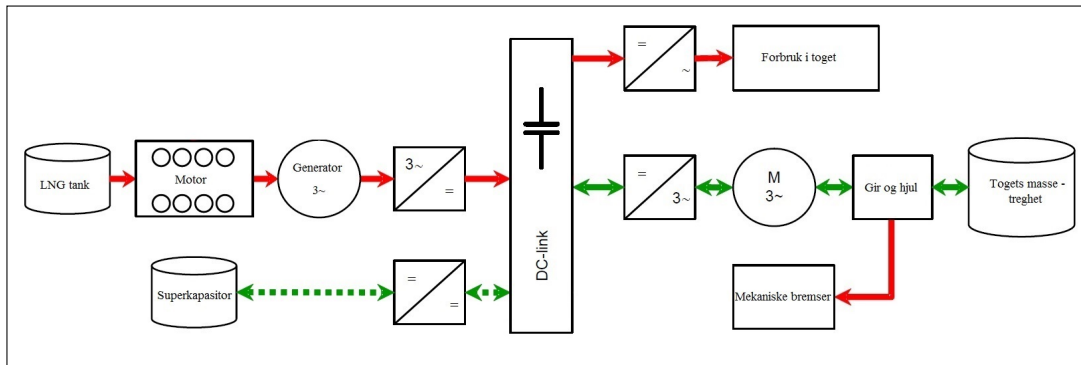
Infrastruktur som følger med i en innfasing av LNG, er hovedsakelig tankanlegg. Eventuelt kan fylling gjøres med tankbil fra sentrale lagre. Rekkevidden til toget vil avgjøre avstanden mellom hver drivstoffylling. Godstog som trekker med seg egen tankvogn, vil kunne ha lang rekkevidde. Derimot vil passasjertog uten denne muligheten ha behov for større tank enn dagens dieseltog for å ha tilsvarende rekkevidde. Dette er grunnet lavere energitetthet i LNG enn diesel, på henholdsvis 5,8 kWh/l og 10,1 kWh/l.

9.2 Simulering av togsett med LNG og EDLC

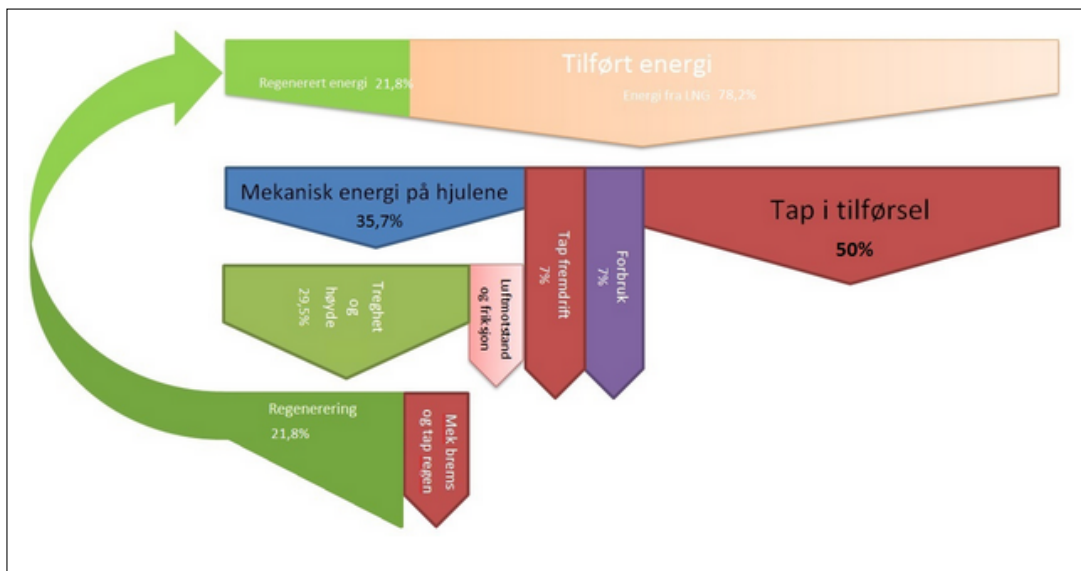
For å redusere forbruk og utslipp ved bruk av fossilt drivstoff er LNG og EDLC kombinert. Uten EDLC er dette en teknologi som allerede er utviklet og kan være en sannsynlig togtype i nær fremtid. For dette togsettet trengs det ikke store endring før det kan implementeres, da teknologien er svært lik diesel.

Figur 9.2 viser hvordan den simulerte modellen er satt sammen. Energien kan gå begge veier fra DC-link til hjul og dermed muliggjøre regenerering ved å lagre energi i EDLC. Figur 9.2 viser energiflyten i et LNG-tog med EDLC.

Ved å sammenlikne figur 6.2 og 9.3 kan man observere at tap i tilførsel er redusert og tilført energi fra drivstoff er gått ned.



Figur 9.2: Skjematiske modell av drivlinje for LNG-tog med EDLC brukt i simulering



Figur 9.3: Energifyt fra simulering for LNG med EDLC alternativ

9.3 Kostnader

9.3.1 Investering

En innføringsfase av ny teknologi vil erfaringsmessig føre til økte kostnader i form av utvikling og forskning. Prosjekter i skipsbransjen ga en merkostnad knyttet til investering sammenliknet med tilgjengelige dieselferger på rundt 20%. Samtidig ble det en redusert merkostnad på rundt 10% i redusert dieselutstyr [54]. En studie gjennomført av GL og MAN, viser liknende tall, der det konkluderes med en tilleggskost for LNG-installasjon på 2400 kr/kW med 14,5 MW installert kraft [55]. Dette er en mye større kraftkilde enn dette prosjektets simulerte togsett, men blir allikevel lagt til grunn for å forenkle

beregninger og synliggjøre at det er en merkostnad. På Rørosbanen antas en installert effekt på 850 kW for persontrafikk, og 4 MW for godstrafikk. Med antatt 8 persontog og 3 godstog, gir dette en investeringskostnad på 557,5 mill. NOK. Om man antar at et togsett har en levetid på 25 år, vil det bli en investeringskostnad på 22,3 mill. NOK/år.

9.3.2 Drivstoffkostnader

Med LNG som drivstoff på jernbanen er det mulig med store økonomiske besparelser. En rapport utgitt av United States Energy Information Administration (EIA) i april 2014, indikerer at LNG kan gi positive utslag for drivstoffkostnader til togselskapene i lang tid fremover. Dersom LNG fortsetter å ha lik pris relativt til diesel som dagens nivå, vil det rettferdiggjøre en høyere investeringskostnad sett over 20 års drift [56]. Med en LNG-pris på 35 øre/kWh [57], [54] og dagens energiforbruket på Rørosbanen, vil drivstoffkostnaden være på 5,3 mill. NOK per år.

Sammenliknet med diesel vil man kunne oppnå redusert NO_x -avgift. Norske avgifter for utslipp av NO_x ligger pr 2015 på 19,19 NOK per kg- NO_x [14]. Ifølge Rolls Royce kan man regne med et utslipp i størrelsesorden 1,2 g/kWh [58]. For Rørosbanen blir denne kostnaden 0,4 mill. NOK per år.

9.3.3 Infrastrukturkostnad

For å kunne tilby LNG på jernbane, må det bygges fyllestasjoner. Dette vil være en tilleggskostnad som må utredes. En indikasjon på pris kan være en fyllestasjon for skip som ble bygd i Danmark nylig med budsjett på rundt 20 mill. NOK [59]. Denne stasjonen er av liknende størrelse og det antas derfor at den vil ha en relativt lik kostnad.

9.3.4 Vedlikehold togsett

Også for LNG togsett er det tatt utgangspunkt i kostnader for vedlikehold av diesel-persontog på Rørosbanen, som nevnt i seksjon 6.3.3. Her antas det en liknende vedlikeholdskostnad, da det er omtrent like mange bevegelige deler.

9.3.5 Oppsummering kostnader

LNG med EDLC [mill. NOK/år]			
Beskrivelse	Person	Gods	Sum
Investeringskostnader			
- Togsett	17,0	5,3	22,3 ¹
- Tankanlegg			0,3 ²
- EDLC	0,1	-	0,1 ³
- EDLC converter	0,1	-	0,1 ⁴
Årlige kostnader			
- Energi	2,8	2,5	5,3
- NO _x -avgift	0,2	0,2	0,4
- Drift og vedlikehold togsett	44,1	15,9	60,1
Sum kostnader			88,5

Tabell 9.1: Oppsummering av kostnader for LNG med EDLC alternativ

9.4 Miljø

9.4.1 CO₂ og NO_x

LNG slipper ut minst CO₂ av de fossile drivstoffene, 2,34 kg-CO₂/kg-LNG ved forbrenning [60]. Sammenliknet med diesel er det 27% lavere utslipp [61]. Det vil heller ikke være nevneverdig problemer med SO₂ eller støv. Utslipp av NO_x vil ved dagens teknologi kunne være ned mot 1,2 g/kWh [58]. Dagens krav til transport ved bruk av tog er 4 g/kWh. Dette gjør LNG 70% bedre med tanke på NO_x-utslipp [15].

Produksjon og distribusjon av LNG vil også påvirke miljøet. Valg av transportmetode kan påvirke sluttregnskapet. En estimasjon kan være 0,33 kg-CO₂/kg-LNG [62] for produksjon og transport. Dette gir en total CO₂ belastning på 2,67 kg-CO₂/kg-LNG.

Totalt er det beregnet og simulert et CO₂-utslipp på 3110 tonn per år, og et NO_x-utslipp på 18,2 tonn per år.

9.4.2 Gassutslipp

Metangass er lettere enn luft og vil ved lekkasje forsvinne ut som luftforurensing. Denne gassen regnes som en meget aggressiv klimagass og ved utslipp vil gevinsten av mindre CO₂ ved forbrenning forsvinne. Ved forbrenning kan også uforbrent metan slippe gjennom og bli med ut i eksosen. Metanutslipp regnes for å ha en 21-25 ganger høyere oppvarmingseffekt på atmosfæren enn CO₂. [63]

¹Kostnader er fordelt på togsettets levetid - 25 år

²Kostnader er fordelt på anleggets levetid - 75 år

³Kostnader er fordelt på komponentets levetid - 75 år

⁴Kostnader er fordelt på komponentets levetid - 25 år

9.5 Datablad

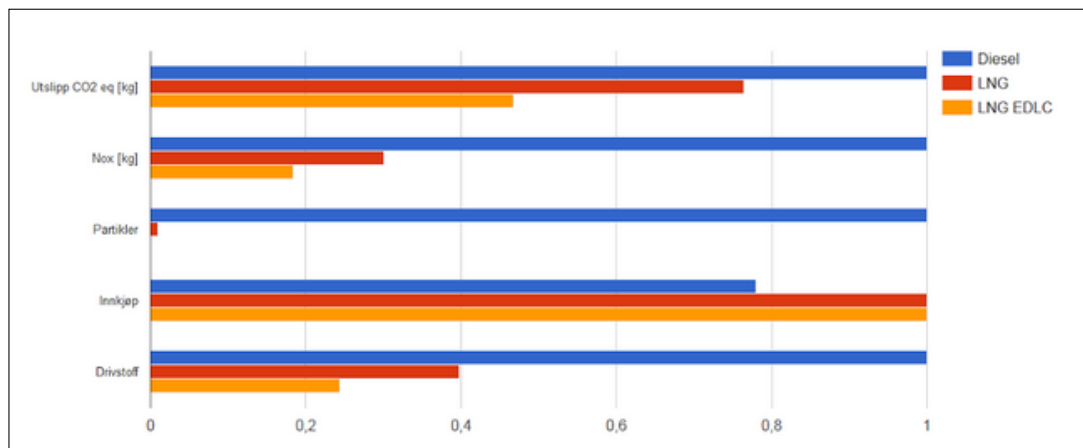
Beskrivelse	Person	Gods	Sum
Vekt persontog [tonn]	81,0	-	-
Energibruk [GWh/år]	7,9	7,3	15,2
CO ₂ -utslipp [tonn/år]	1628	1482	3110
NO _x -utslipp [tonn/år]	9,5	8,7	18,2
Sum kostnader [mill. NOK/år]			88,5

Tabell 9.2: Datablad for LNG med EDLC

9.6 Fordeler og ulemper med LNG

9.6.1 Fordeler

LNG er godt kjent i skipsbransjen og krever derfor ikke stor teknologisk utvikling, og det er gode erfaringer derfra med tanke på miljø. Det kreves heller ingen endring i eksisterende bane utenom tankanlegg. Miljømessig er det et godt alternativ til diesel og spesielt i en kombinasjon med EDLC. Dette vises i figur 9.4.



Figur 9.4: Sammenlikning av utslipp og kostnad for diesel, LNG og LNG med EDLC, for persontog på Rørosbanen.

9.6.2 Ulemper

Det må bygges og utvikles forsyningssystem tilpasset jernbanebruk med medfølgende nye rutiner. Små utslipp av gass vil være alvorlig for klimaet. Gass tar mer plass enn diesel og vil derfor kreve større tanker i tillegg til at disse må være isolerte. Man slipper

ikke unna at LNG er en fossil energikilde, og derfor aldri vil være et utslippsnøytralt alternativ. Hittil har de fleste prosjekter konsentrert seg om blandingsdrift med LNG og diesel. For å oppnå maksimale miljøfordeler må man gå over til ren gassdrift.

Kapittel 10

Hydrogen

10.1 Introduksjon

10.1.1 Hydrogen i togfremføring

Gjennom media kan man anslå at det finnes omtrent fire til fem operative jernbanestrekninger hvor hydrogen er det primære drivstoffet. I Sør-Afrika brukes hydrogenlokomotiv i gruvedrift [64], på Aruba og i Dubai brukes det til turisttransport [65], [66], og i Storbritannia ble det første prototypelokomotivet, drevet av hydrogen, demonstrert i juni 2012 [67]. For å kunne analysere økonomi- og miljøkonsekvenser ved bruk av hydrogen som drivstoff på Rørosbanen, blir det først gjort en generell gjennomgang av hydrogen og brenselceller.

10.1.2 Utvikling

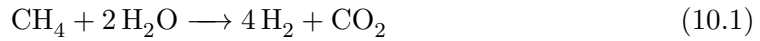
Historisk har hydrogenteknologien sitt opphav i den amerikanske romfartsindustrien. For å kunne utforske verdensrommet behøvde man store mengder energi i utskytningsfasen. Flytende hydrogen er et svært kraftfullt drivstoff, og i kombinasjon med flytende oksygen gir det ekstremt høy spesifikk impuls, som er forholdet mellom motorens skyvekraft og drivstoff-forbruket [Newton/J] [68], [69]. Senere har forskning ført til store teknologiske fremskritt knyttet til hydrogen som energikilde for persontransport, særlig i Japan og USA [70].

10.1.3 Prinsipper for fremstilling

Hydrogen kan fremstilles på mange måter. To realiserbare metoder i Norge kan være dampreforming og elektrolyse, ved bruk av henholdsvis metangass og elektrisk strøm. Grunnen til at akkurat disse metodene er aktuelle, er tilgangen på store mengder naturgass, biogass og ikke-utnyttet vindkraft [71].

10.1.3.1 Dampreforming

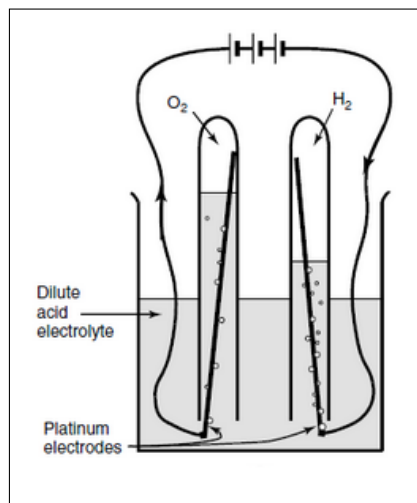
Dampreforming er en av de billigste og mest brukte metodene for fremstilling av hydrogen. Den kjemiske reaksjonen er:



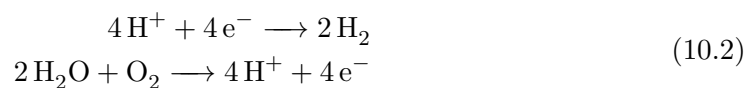
Høy temperatur, vanligvis mellom 700 og 850°C, trengs for å tvinge frem reaksjonen med metan (naturgass, biogass etc.) og vanndamp. Denne varmen kan for eksempel tilføres ved å brenne noe av gassen. Dette gjør energien dyrere og energiutbyttet lavere sammenliknet med benyttelse av naturgass direkte. I reaksjonen skilles hydrogen fra vann slik at resultatet blir rent hydrogen og ren karbondioksid. Typisk virkningsgrad for denne prosessen kan være 80 til 90%. For at teknologien skal kunne karakteriseres som miljøvennlig, må karbondioksid fjernes og lagres, hvilket krever ytterligere energi, og senker virkningsgraden [72]. Denne teknologien blir ikke vurdert videre i denne prosjektoppgaven grunnet CO₂ som biprodukt i produksjonen.

10.1.3.2 Elektrolyse

En annen måte å fremstille rent hydrogen på, er elektrolyse. Vann splittes til hydrogen og oksygen ved tilførsel av elektrisk energi, som illustrert i figur 10.1, og gitt av den kjemiske reaksjonslikningen 10.2. Elektrolyse var den første industrielle metoden for å produsere hydrogen og var den ledende produksjonsmetoden fram til slutten av 1970-tallet.



Figur 10.1: Prinsipp for elektrolyse



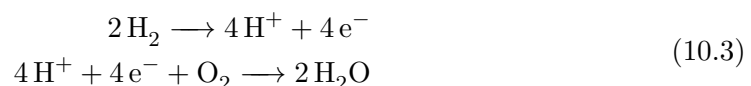
Alkaliske elektrolyserør har blitt benyttet opp gjennom historien og er fortsatt den eneste teknologien som er kommersialisert. Dette er en moden teknologi med mange kommersielle aktører. Navnet kommer fra den alkaliske elektrolytten i systemet som ofte er en vanlig kaliumhydroksidløsning (KOH). Gjennomsnittlig energiforbruk er omtrent 4,5 kWh/normalkubikkmeter hydrogen som gir en elektrisk virkningsgrad på rundt 67%. Teknologien er modulær og det selges moduler med effektbehov fra noen få kW til flere MW. [73], [74]

PEM-elektrolyse teknologien går ut på å bruke en polymer-elektrolytt-membran (PEM) i elektrolysen. Teknologien bygger på samme type membran som brukes i polymer elektrolytt membran brenselceller (PEMFC), men det benyttes delvis andre katalysatorer og materialer. Det er generelt muligheter for små kompakte systemer basert på denne teknologien og forbedrede virkningsgrader helt opp mot 85%. Levetiden knyttet til derimot stor usikkerhet rundt og kostnaden er foreløpig høy. Derfor er det valgt å ikke bruke denne metoden til å fremstille hydrogen i denne oppgaven, men derimot brukt alkalisk elektrolyse. [73], [75].

Det finnes flere eksempler på allerede operative systemer som benytter seg av vindkraft i produksjon av hydrogen. Vattenfall var med å starte et slikt anlegg for produksjon av hydrogen i Prenzlau, nord for Berlin i oktober 2011 og ble det første av sitt slag i Europa [76], [77]. I Norge har man tenkt i disse baner, men dette har ennå ikke blitt realisert [78]. I USA foregår det mye forskning på denne teknologien, spesielt ved National Renewable Energy Lab (NREL)[79], [80].

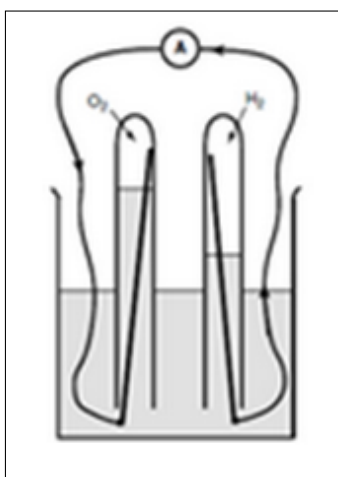
10.1.4 Prinsipper for brenselcellen

Prinsippet for brenselcellen er enkelt, se figur 10.2. I kontakt med elektroden (ofte platina), spaltes hydrogen til hydrogenioner (protoner) og elektroner. Elektrolytten er en flytende løsning som inneholder frie hydrogenioner, og elektroner kan bevege seg gjennom den ytre elektriske kretsen. Ved katoden reagerer hydrogen med oksygen og danner rent vann, se reaksjonslikning 10.3. Man sier gjerne at hydrogen brennes, derav navnet brenselcelle [70].



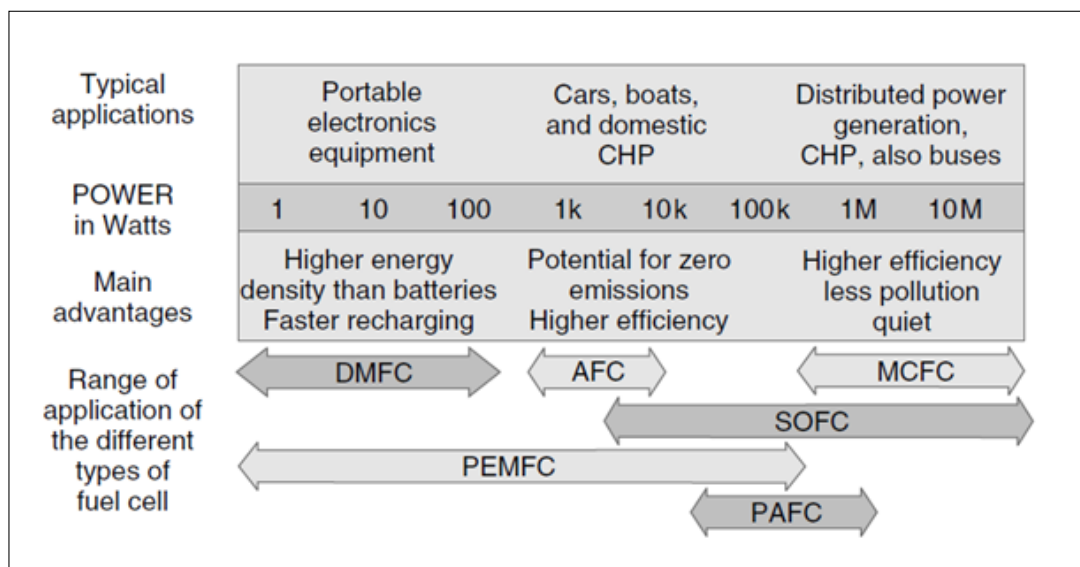
10.1.5 Forskjellige typer brenselceller

Det finnes mange forskjellige typer brenselceller med forskjellige egenskaper og bruksområder. En oversikt over brenselceller og typiske bruksområder er gjengitt i figur 10.3. Gjennomført simulering viser at persontog som trafikkerer Rørosbanen trenger en korttidseffekt på omtrent 1 MW når de akselererer, og i snitt omtrent 0,2 MW når de kjører mellom stasjoner. Som vist i figur 10.3 kan det være aktuelt å benytte løsninger som SOFC eller PEMFC med en regenereringsenhet. I denne prosjektoppgaven sees det først og fremst på løsninger knyttet til Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC). Prinsippet bak denne er tilsvarende det som ble forklart i seksjon 10.1.4. Forskjellen er at



Figur 10.2: Prinsipp for brenselcelle

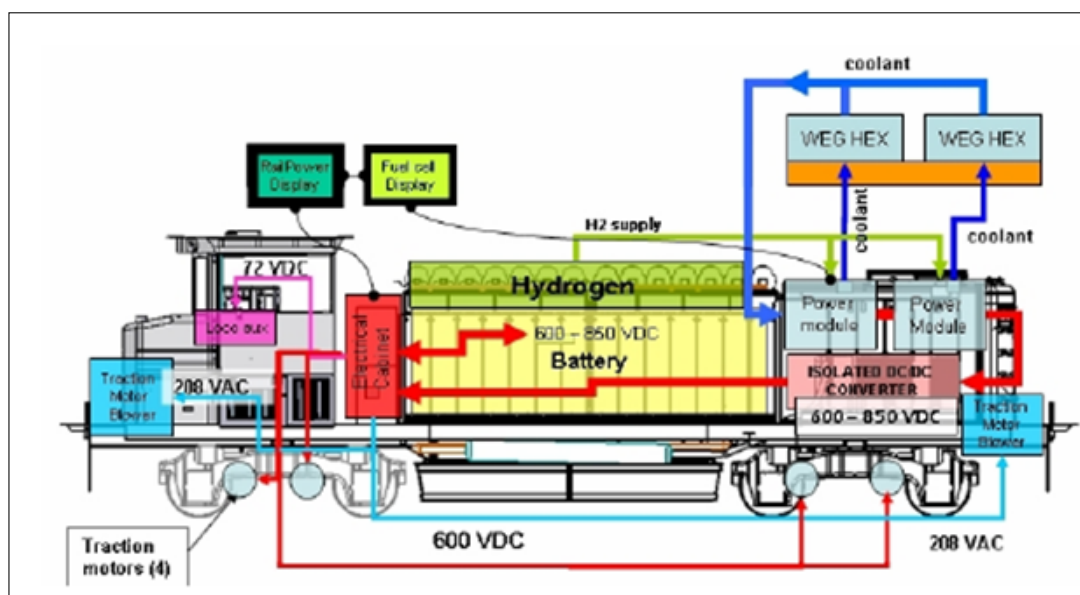
elektrolytten i denne brenselcellen er en polymer med frie hydrogenioner. Brenselcellesystemer for togfremføring er designet tidligere, og man oppnår en høyere virkningsgrad ved bruk av brenselceller sammenliknet med diesel. [81]



Figur 10.3: Aktuelle brenselceller for ulike kraftnivåer [70]

10.1.6 Eksempel på lokomotivdesign

Systemer basert på brenselceller lages gjerne som moduler. Design av brenselcellelokomotiv har en klar likhet med design av brenselcellebusser og et eksempel på lokomotivdesign, som er basert på Citaro transit bus, er gjengitt i figur 10.4. Lokomotivet drives av en PEM brenselcelle som kan levere 250 kW. I tillegg har lokomotivet et batteri som settes inn når kraftbehovet er høyere. Dette loket kan maksimalt levere 1,2 MW, noe som vanligvis trengs kun i noen få minutter. Brenselcellen er plassert i bakre del av lokomotivet, sammen med kjølesystem og kraftomformer. Toget har også en tank med plass til 70 kg hydrogen.



Figur 10.4: Eksempel på lokomotivdesign for hydrogenlokomotiv [82]

Hydrogen er lettere enn luft og av sikkerhetsmessige årsaker blir hydrogentankene her plassert over batteriet. Plasseringen gir mindre sannsynlighet for kritiske skader på hydrogenbeholderen under tanking eller fra eventuelle sammenstøt. Takplassering gir dessuten liten endring i lokomotivets tyngdepunkt.

10.1.7 Infrastruktur

Aktuelle måter å frakte hydrogen på kan være rør eller veitransport. En analyse for hvordan hydrogen og infrastrukturen i Norge kan se ut i årene fremover, ble gjort av Holst et. al. i 2010 [71]. Analysen forventer at 93% av transportert hydrogen vil fraktes på vei i 2015. I denne prosjektoppgaven er det valgt en løsning hvor man produserer hydrogen i nærheten av en togstasjon for å minimere fraktkostnader. På Rørosbanen trengs det mest trolig kun én hydrogenstasjon for påfylling av drivstoff.

10.1.8 Lagring

Det er utfordringer knyttet til lagring av hydrogengass. Gassen er ekstremt flyktig noe som betyr at den lett diffunderer og reagerer, altså danner andre uønskede kjemiske produkter. Gassen har lav massetetthet på omtrent 0.084 kg/m^3 ved NTP [70], dette gir en lav energitetthet. Denne egenskapen er ikke ideell i transportsammenheng, lagret hydrogen må derfor modifisere slik at en høyere energitetthet oppnåes.

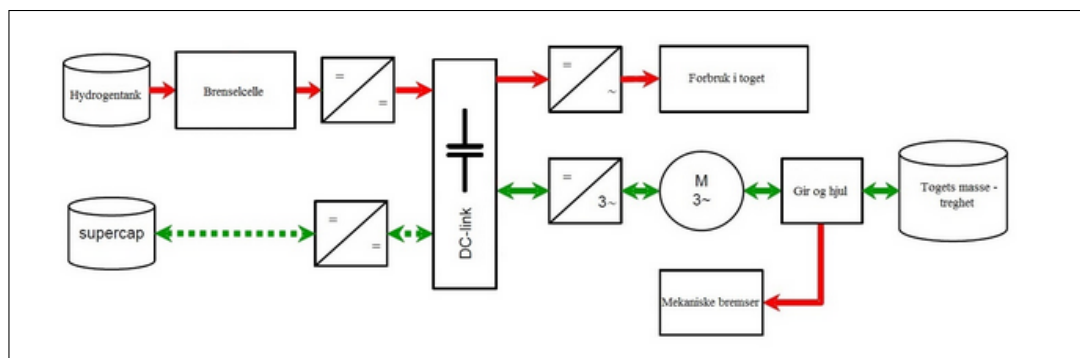
Lagringsproblemet er komplekst, og løsninger deles gjerne opp i to kategorier. Første løsningskategori går ut på å lagre hydrogengassen slik den er. Dette vil si enten i gassform, flytende eller lagret i en absorbent (f.eks. karbon-nanofibre eller metallabsorbent). Den andre prinsipielle måten er at hydrogengass lagres i hydrogenrike kjemikalier. Dette kan for eksempel være ammonium eller metanol [70].

10.2 Simulering av togsett med hydrogen og EDLC

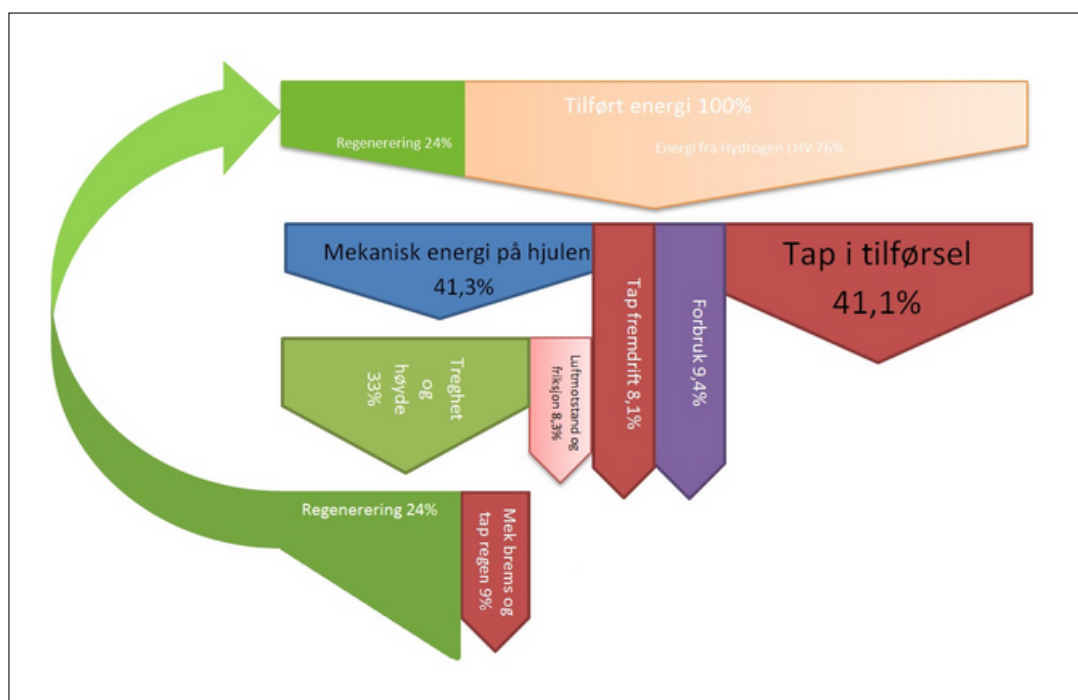
Vekten av togetsett vil hovedsaklig være avhengig av vekt på superkondensator, tankanlegg, brenselcellemoduler og rammekonstruksjonen. Vekten på EDLC har blitt antatt å være i størrelsesorden ett tonn i simuleringen.

En hydrogensylinder på 100 kg laget av lett kompositt, kan lagre omtrent 3,1 kg hydrogen [70]. På Rørosbanen kan hydrogentanken på persontogene dimensjoneres for å lagre 100 kg hydrogen. Ved å anta at systemeksempelet over er overførbart til vårt system, tilsvarer det en tankvekt på omtrent 3,2 tonn. For PEM brenselcellen antas det en vekt på omtrent 700 kg [83]. Til sammen vil dette bli rundt 4 tonn. Hydrogenet kan lagres ved 70 MPa [84] og ha en massetetthet på omtrent $0,039 \text{ kg/l}$ [85]. Dette gjør at volumet på tanken blir i størrelsesorden $2,6 \text{ m}^3$.

I simuleringen har det blitt brukt en modell som vist i figur 10.5 for å simulere hydrogen med EDLC. I godsframføring kreves det en mye høyere effekt og diesel brukes derfor fortsatt til dette. Figur 10.6 viser energiflyten i et hydrogentog med EDLC.



Figur 10.5: Skjematisk modell av drivlinje for hydrogentog med EDLC brukt i simulering



Figur 10.6: Energifyt fra simulering for hydrogen med EDLC alternativ

10.3 Kostnader

10.3.1 Drivstoffkostnader

Det simulerte hydrogenforbruket på Rørosbanen er omtrent 175 200 kg årlig. For å komme frem til en realistisk hydrogenkostnad er det benyttet to forskjellige kilder. Dagens hydrogenpris i det norske markedet er på 90 NOK/kg [86]. Dette ville tilsvart en årlig drivstoffkostnad på omtrent 15,8 mill. NOK. Denne kostnaden er antatt å være noe høy i forhold til hva som er mulig for Jernbaneverket. En amerikansk studie fra 2009 estimerer en hydrogenkostnad på 40,4 NOK/kg [87]. Dette inkluderer en produksjonskostnad på 25,8 NOK/kg-hydrogen og en kostnad for kompresjon, lagring og distribusjon på 14,6 NOK/kg-hydrogen. Dette tilsvarer en årlig kostnad på 7,1 mill. NOK. Det amerikanske kostnadsestimatet sees på som noe optimistisk og det blir derfor brukt en gjennomsnittskostnad på 11,5 mill. NOK/år. Det er tatt utgangspunkt i at diesel fortsatt benyttes i togfremføring av godstransport.

10.3.2 Tankanlegg på stasjon

Det antas en kostnad knyttet til tankanlegg på stasjon i størrelsesorden 20 mill. NOK tilsvarende for tankanlegget til LNG

10.3.3 Investeringskostnad motorvognsett

10.3.3.1 Brenselcellesystem

Systemer basert på brenselceller lages gjerne som moduler, og design av tog likner som nevnt tidligere design av brenselcellebusser. Det kan generelt antas en kostnad på omtrent 2 500 NOK/kW for et PEM-brenselcellesystem med operasjonstid på omtrent 12 000 timer [88], [89], [90]. Med utgangspunkt i NSBs rutetabell vil hver brenselcellemodul ha en operasjonstid på omtrent 6 timer i døgnet. Dette fører anslagsvis til utskiftning av brenselcellesystemet omtrent hvert 5. år. I simulering og analyser brukes 250 kW kontinuerlig effekt for togfremføring på Rørosbanen. Dette fører til en kostnad knyttet til brenselcellesystemet på rundt 1 mill. NOK/motorvognsett. Ved innkjøp av 8 motorvognsett til fremføring av persontransporten vil kostnaden være omtrent 8 mill. NOK. Videre utvikling med flere produserte brenselcellesystemer viser en mulig pris på 703 NOK/kW og en operasjonstid på over 20 000 timer [90].

10.3.3.2 Vedlikeholdskostnader togsett

For togsett drevet av hydrogen er det antatt en lik vedlikeholdskostnad med togsett drevet av KL. Dette er fordi det er få bevegelige deler også i forbindelse med brenselcelletog.

10.3.4 Oppsummering kostnader

Hydrogen med EDLC [mill. NOK/år]			
Beskrivelse	Person	Gods (diesel)	Sum
Investeringskostnader			
- Togsett (eks. brenselcelle)	16,4	4,2	20,6 ¹
- EDLC kostnad	0,1	-	0,1 ²
- EDLC converter	0,1	-	0,1 ³
- Brenselcelle	1,0	-	1,0 ⁴
- Tankanlegg stasjon	0,8	-	0,8 ⁵
Årlige kostnader			
- Energi	11,5	5,8	16,8
- NOx-avgift	0	0,6	0,6
- Vedlikehold togsett	37,1	15,9	53,0
Sum kostnader	67,0	26,5	93,5

Tabell 10.1: Oppsummering av kostnader for hydrogen med EDLC alternativ

10.4 Miljø

Et energisystem basert på hydrogen kan i prinsippet være et såkalt nullutslippssystem. Dette betyr i utgangspunktet ingen utslipp av karbondioksid, og er hovedargumentet for benyttelse av hydrogen i transportsektoren. For benyttelse av elektrolyse kreves strøm som er 100% ren om man skal regne det som et nullutslippssystem. I denne oppgaven er det lagt til grunn at at det norske el-nettet er nordisk miks som gir 210 g CO₂/kWh. Et hydrogenproduserende anlegg vil ikke gi miljøgevinst med dette utslippet. Det anses ikke som et reelt alternativ og det må derfor bygges en egen fornybar kilde til produksjon av hydrogen. Denne energiproduksjonens utslipp antas å være norsk miks på 50g/kWh. Prosessen i brenselcellen, som forklart i seksjon 10.1.4, har ingen utslipp av klimagasser. Det antas også at CO₂-utslipp knyttet til transport fra produksjonssted til tankanlegget på stasjon er neglisjerbart.

I 2006 vurderte en britisk studie miljøkonsekvensene ved et hydrogenbasert energisystem [91]. Studien påpeker at hydrogen er en flyktig gass og vil reagere med hydroksylradikaler i troposfæren og på denne måten kunne forstyrre distribusjonen av metan – og ozon-gass. Forskerne estimerte dette oppvarmingspotensialet til å være i størrelsesorden 0,6% av oppvarmingspotensialet til et tilsvarende fossilt system. Dette forutsatte et hydrogenutslipp på 1% av produsert hydrogen. Maksimal miljøgevinst oppnås dermed kun ved nøye kontroll av utslipp i produksjons-, lagrings- og forbruksfase. I denne oppgaven antas det nullutslipp knyttet til lagring av hydrogen.

CO₂-utslipp knyttet til produksjon av brenselcellemodul kan estimeres til 61 kg/kW. Med den installerte effekten fører dette til et CO₂-utslipp på 122 tonn hvert 5. år [92].

10.5 Datablad

Datablad hydrogen med EDLC alternativ			
Beskrivelse	Person	Gods	Sum
Vekt togsett [tonn]	70,0	-	-
Energibruk [GWh/år]	4,7	7,3	12,0
CO ₂ -utslipp (norsk mix) [tonn/år]	463	2228	2691
NOX-utslipp [tonn/år]	0	29	29
Sum kostnader [mill. NOK/år]	67,0	26,5	93,5

Tabell 10.2: Datablad for hydrogen med EDLC alternativ

¹Kostnader er fordelt på togsettets levetid - 25 år

²Kostnader er fordelt på komponentets levetid - 75 år

³Kostnader er fordelt på komponentets levetid - 25 år

⁴Kostnader er fordelt på komponentets levetid - 5 år

⁵Kostnader er fordelt på anleggets levetid - 25 år

10.6 Fordeler og ulemper med hydrogen

10.6.1 Fordeler

Generelle fordeler ved brenselceller er at de har en høy virkningsgrad relativt til forbrenningsteknologier [81], [70]. Prinsippet bak brenselcellen er enkelt, noe som gir potensiale for et robust og vedlikeholdsvennlig system. Ved operasjon av en brenselcelle, er det et svært lavt støynivå og det knyttes ingen lokalutslipp til brenselcellen, noe som sees på som veldig positivt. Sluttproduktet fra brenselcellen er rent vann, forutsatt at rent hydrogen benyttes, og systemet har potensiale for å være et nullutslippsystem.

Et av de store problemene ved innføring av hydrogenbiler i Norge og verden er mangelen på tankanlegg. For at bilene skal kunne bevege seg fritt må man ha infrastruktur som tillater at tanking kan skje overalt. På tog er dette problemet ikke så stort da jernbanen går på faste strekninger.

10.6.2 Ulemper

Hydrogen i togfremføring er en lite utprøvd teknologi. Det er noen trikker og små lok som går på hydrogen, men det er ikke brukt i vanlig transport hvor det er krav om å være punktlig og effektiv. En ulempe er den potensielle skepsisen til hydrogen da dette er en antennelig gass med høy energi og at det har skjedd ulykker med hydrogengass før.

Kapittel 11

Batteri

11.1 Introduksjon

Lagring av energi i klassiske elektriske batterier har vært i bruk siden midten av 1700-tallet. Batteriteknologien er i konstant utvikling, og i de siste årene har det vært en enorm forskning på feltet. En stadig større andel av energien verden produserer er grønn og elektrisk, dette gjør at batterier blir et svært viktig alternativ til ikke-fornybare energikilder for transportsektoren i fremtiden [93]. Den seneste forskningen har ført til stor økning i batterienes spesifikke energi, spesielt for lithium-ion batterier, batteritypen som er mest brukt i elbiler.

Vanlige elektriske batterier er en energibærer, og lagrer energi ved en elektrokjemisk reaksjon. En strøm går mellom en anode og en katode, gjennom en flytende elektrolytt. Oftest blir det brukt lithium-baserte løsninger, og det er denne typen batterier som blir vurdert i denne rapporten. [94]

En begrensende faktor for batterier i togsammenheng, er lav spesifikk effekt. Hastigheten til ladbærere i elektrolytten begrenser hvor fort batteriet kan utlades eller lades opp. Dersom toget bremses med regenerering, kan effektbehovet bli høyere enn batteriets evne til å ta opp energi. Det må da suppleres med mekanisk bremskraft som gir energitap i form av varme. Toget vil heller ikke kunne akselere hurtig nok. For å unngå dette vil det være aktuelt med en kombinasjon av batteri og en annen energilagringseenhet med høyere spesifikk effekt. En slik enhet vil dessuten redusere batteriets sykluser, og dermed forlenge dets levetid. [94]

Et fellestrekk for alle batterier, i motsetning til drivstoffteknologier som diesel eller LNG, er at de fortsatt har relativt lav spesifikk energi. Et tog drevet av kun batteri, kan derfor bli svært tungt ved et stort energibehov, og denne tyngden vil gjøre at det blir nødvendig med et lengre tog. Dette gjelder i hovedsak godstog for Rørosbanen. I Norge er dette utfordrende grunnet korte kryssingsspor. Med et jernbanenett med dobbeltspor vil man kunne ha lengre motorvognsett og denne vekten ville ikke vært like problematisk. Uansett vil ekstra vekt føre til et høyere energiforbruk. En mulig løsning på vektufordringen, kan være delvis elektrifisering. En kort elektrifisert strekning vil kunne gi en oppladning, og gjøre vekten av batteriet betydelig mindre. Dette vil ikke bli

diskutert videre i denne oppgaven. [94]

11.1.1 Aktuelle batterityper

Elbil-industrien har utvilsomt vært en av de viktigste drivkreftene for utviklingen av batterier siden 90-tallet, med Tesla Motors i spissen de siste fem årene. Med utgangspunkt Teslas nyeste biler, kan man finne gode tekniske data om dagens situasjon for lithium-ion batterier. Batteriene brukt i Tesla S er produsert av Panasonic, og er av typen NCR18650B. Disse batteriene har en spesifikk energi på 243 Wh/kg og energitetthet på 676 Wh/l. Den spesifikke effekten ligger på mellom 124 og 143 W/kg i oppladningstiden. Selvtladingen til disse batteriene er svært lav, omtrent 0,1% av den totale energien blir tapt i løpet av en dag. Batteriets levetid ligger i dag på omtrent 500 sykluser. Om batteriet blir brukt på en gunstig måte, det vil si ikke blir hurtigladd opp og ut, vil antallet sykluser ligge på rundt 1 000. Dette kan imidlertid komme opp mot 1500-2000 sykluser, avhengig av lademønsteret [95]. I denne sammenhengen er det svært gunstig å bruke en EDLC i tog, da man får en lav, jevn belastning.

Det er også en rekke andre batterityper på markedet. Noen eksempler er; nikkellmetall hybrid, natrium/nikkel-klorid, flytende metallbatterier og redoks batteri. Alle disse har enten for lav spesifikk energi, for få livssykluser (levetid), en blanding av disse, eller at man ikke har kommet langt nok i forskningen til at det kan være et realistisk alternativ for togfremføring. [96]

11.1.2 Forskning

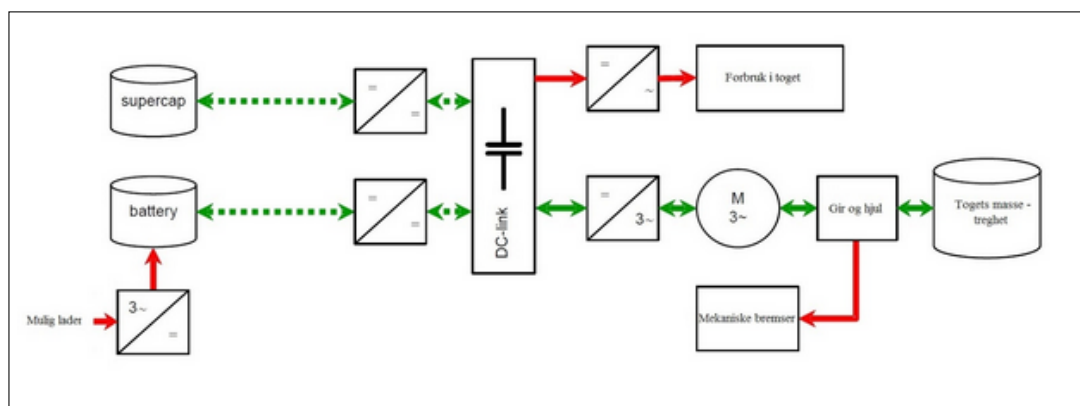
En høyere spesifikk energi er et stort ønske for batterier i fremtiden. For å få til dette, må man øke kapasiteten til elektrodematerialet, uten at det påvirker spenningsnivået i batteriet. Det blir forsket på bruk av lithiumlegeringer med tinn eller silisium i elektroden. Både silisium og tinn er billig og miljøvennlig, og det finnes store mengder av dette i verden. Disse to legeringene kan øke den spesifikke energien i batteriet med en faktor på mellom 3 og 10 [97]. Utfordringen er at disse legeringene ekspanderer kraftig ved temperaturendringer. Dette fører til sprekker i legeringen, og etter noen få batterisykluser blir det bare pulver igjen. Ved hjelp av nanoteknologi kan problemet løses til en viss grad. Med mindre partikkelstørrelser kan volumendringen kontrolleres bedre, og dermed økes batteriets levetid, men dette går på bekostning av batteriets energitetthet. [96]

Et alternativ i fremtiden er å bruke oksygen som katode (lithium-air batterier). En slik løsning kan teoretisk gi spesifikke energier på nivå med diesel. Det pågår mye forskning, men det finnes foreløpig lite resultater. Det har vært usikkerhet knyttet til om det er nok lithium i verden til at all transport kan bli batteridrevet. Dette anses ikke som et problem da det er oppdaget svært mye lithium, og det stadig blir gjort nye store funn [98].

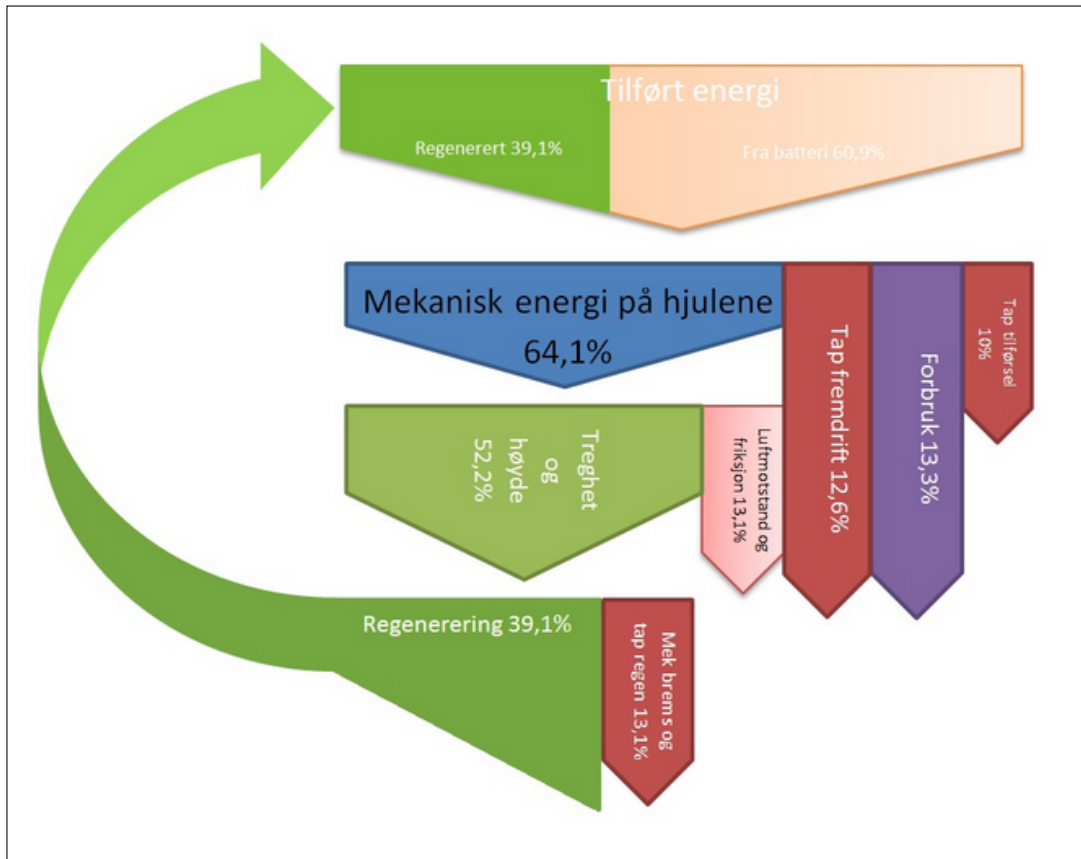
11.2 Simulering av togsett med batteri og EDLC

Det er brukt en batteristørrelse på 1700 kWh i persontogene på Rørosbanen. Denne størrelsen gjør at et tog kan kjøre en tur-retur Hamar-Trondheim. Dette kan være en overdimensjonering, men det vil gjøre at batteriene har en maksimal effekt på omtrent 1 MW. Med denne størrelsen vil man ikke behøve å hurtiglade eller hurtigutlande batteriene når de er i bruk, dersom det kombineres med EDLC. Dette kan forlenge batterienes levetid med over 100% og vil derfor forsvares med en lavere årlig batterikostnad. Dessuten gjør dette at togene fortsetter å gå om det skulle være en ladestasjon ute av drift i enten i Trondheim, Hamar eller Røros. Valget er derfor også gunstig for en punktlig og effektiv jernbane. Batteriteknologi har svært god virkningsgrad sammenlignet med andre teknologier og det er derfor et svært lavt energiforbruk ved bruk av batteritog med EDLC. Det eneste alternativet med en tilsvarende virkningsgrad er elektriske tog.

For persontog på Rørosbanen viser det seg at batterivekten ikke vil være et problem, men for godstog er det antatt at det fortsatt vil være nødvendig å kjøre på diesel. Man regner en spesifikk energi på 243 Wh/kg. Dette er kun vekten av battericellen, og i simuleringen er det brukt en spesifikk energi på 160 Wh/kg for å få med vekten av resten av systemet med tilhørende kjøling. Dette blir estimert til en totalvekt på omlag 11 tonn per togsett. En annen faktor er hvor mye plass et batteri vil ta opp. For persontog på Rørosbanen vil batteriene kreve over 5 kubikkmeter om man antar at systemet, i tillegg til cellene, har en massetetthet som er lavere eller lik massetettheten til cellene. Dette vil være noe man må ta hensyn til, men vil ikke være et vesentlig problem. I figur 11.1 er det vist en skjematisk modellering av drivlinjen brukt i batteritog alternativet. I figur 11.2 kan man også se energiflyten til dette alternativet



Figur 11.1: Skjematisk modell av drivlinje for batteritog med EDLC brukt i simulering



Figur 11.2: Energifyt fra simulering for batteri med EDLC alternativ

11.3 Kostnader

11.3.1 Batterikostnad

Dagens kostnad på lithium-ion batterier ligger på rundt 3000-3800 NOK/kWh [99]. Med utgangspunkt i strekningen Hamar-Støren og batteristørrelse 1700 kWh, vil batterikostnaden ligge på omtrent 5,8 mill. NOK per motorvognsett, altså totalt 46 mill. NOK for de 8 togsettene. Denne batteristørrelsen er brukt for å holde antall sykluser nede og dermed øke levetiden til batteriet. Simuleringer og utregninger viser at batteriet må byttes hvert 4. år, dersom persontrafikken på Rørosbanen forblir som i dag og man antar at et batteri har 1000 sykluser. Da vil den årlige kostnaden for batterier bli på omtrent 11 mill. NOK.

Det er forventet at batteriprisene vil synke. I 2012 foreslo konsultselskapet McKinsey i rapporten “A portfolio of power-trains for Europe; a fact based analysis” at prisen for lithium-ion batterier ville gå ned mot 1500 NOK/kWh innen 2020 [100]. I september 2014, kom den amerikanske investeringsbanken Citigroup med rapporten “Energy Dar-

winism II”, hvor de estimerer en enda raskere nedgang, med en pris på 1800 NOK/kWh innen en 7-8 års periode [101]. I tillegg anslår de at mer utvikling vil kunne få prisen ned mot 1200 NOK/kWh. Andre er enda mer optimistiske. Storbanken USB og konsultentselskapet Navigant foreslår en pris på 1800 NOK/kWh allerede etter 2-3 år, og at prisen videre nærmer seg 800 NOK/kWh [102]. I sistnevnte tilfelle vil kostnad ved innkjøp av batteri per motorvognsett være 1,3 mill. NOK for beregningene på Rørosbanen. I rapporten tas det utgangspunkt i dagens priser for fremtidige batteribytter.

11.3.2 Infrastrukturkostnad

En eller flere ladestasjoner på strekningen Hamar-Støren vil kunne være nødvendig. Dette blir en engangskostnad med relativt lite vedlikehold. For å lade et vanlig passasjertog som går på Rørosbanen, trengs en effekt på omtrent 1 MW. For ikke å overbelaste strømmettet kan det være aktuelt med ekstra energilagring på ladestasjonen. Fergesambandet Lavik-Oppedal på europavei 39 har en sammenliknbar ladestasjon som leverer 1 MW. Dette har en indikert kostnad på 20 mill. NOK [103]. For togsettene på Rørosbanen vil det være gunstig å lade opp batteriene like hurtig eller saktere enn de lades ut i drift. For å gjøre dette trengs det en ladestasjon på omtrent 250 kW, det vil si at en ladestasjon på 1 MW kan forsyne 4 tog på samme tid. Siden alle tog ved denne effekten vil bruke 4-6 timer på lades opp, antas det at det er behov for minimum 3 stasjoner av samme størrelse som Lavik-Oppedal ladestasjonen. Det vil her bli en engangskostnad på 60 mill. NOK. I beregninger er det antatt at disse stasjonene har en levetid på 25 år.

11.3.3 Variabel investeringskostnad motorvognsett

Som estimert i seksjon 6.3.1 vil innkjøp av dieseltog på Rørosbanen koste omtrent 51,25 mill. NOK per togsett. Det kan antas at investeringskostnad knyttet til drivlinje med batteri, vil være i samme størrelsesorden som investering i dieselgenerator og dermed ikke føre til merkostnad. [104] Totalt vil man da ha en investeringskostnad på 410 mill. NOK for 8 persontogsett.

11.3.4 Strømkostnader

En strømkostnad er beregnet ut i fra energibruken for passasjertog på strekningen. Det er simulert et årlig forbruk fra batteriene på omtrent 3,3 GWh. Denne energien må da tilføres batteriene gjennom lading og vil ha en kostnad på 1,6 mill. NOK. per år, om man antar en strømpris på 0,48 kr/kWh.

11.3.5 Vedlikeholdskostnader motorvognsett

For personmotorvognsett drevet av batteri, er det antatt en lik vedlikeholdskostnad som KL. Få bevegelige deler i begge systemene fører til mindre slitasje. Fra KL finner vi denne kostnaden estimert til 37,1 mill.NOK/år

11.3.6 Oppsummering kostnader

Batteri med EDLC [mill. NOK/år]			
Beskrivelse	Person	Gods (diesel)	Sum
Investeringskostnader			
- Togsett	16,4	4,2	20,6 ¹
- EDLC kostnad	0,1	-	0,1 ²
- EDLC converter	0,1	-	0,1 ³
- Batteri	11,6	-	11,6 ⁴
- Infrastruktur (ladestasjon)	2,4	-	2,4 ⁵
Årlige kostnader			
- Energi	1,6	5,8	7,4
- NOx-avgift	0,0	0,6	0,6
- Vedlikehold togsett	37,1	15,9	53,0
Sum kostnader	69,2	26,5	95,7

Tabell 11.1: Oppsummering av kostnader for batteri med EDLC alternativ

11.4 Miljø

Prosessen med å lage lithium-ion batteri er fortsatt i et tidlig stadié, og om den gjøres billigere og hurtigere vil denne energilagringsteknologien være enda mer aktuell i stor skala i verdenssammenheng. Det er en komplisert prosess å fremstille lithium. Lithium kommer fra mineralet spodumen. Dette råstoffet, som også kalles lithiualuminium-silikat behandles med en konsentrert svovelsyre på 250 °C. Det dannes sulfater, og disse løses i vann. For å få rent lithium må man også tilsette soda. Tilslutt må det gjennomføres en elektrolyse der sluttproduktet er lithum-metall [105].

I 2012 ble det utgitt en artikkel ved NTNU som utredet miljøpåvirkningen til batteridrevende biler [106]. Artikkelen fastslo at en elbil med lithium-ion batteri, bare er 9-27% bedre for miljøet og klimaendringene enn en vanlig dieseldrevet bil. Det er ikke bare miljøpåvirkning i forbindelse med produksjon av batteriet som er tatt i betraktning, men også utslipp ved å lage motor, likerettere/vekselrettere, kjølesystem, og også avhending.

Ved å regne om tall fra denne rapporten (vedlegg espen beregninger) får man et utslipp til batteriproduksjon i området 65-84 kg-CO₂/kWh produsert batteri. En alternativ studie gjennomført i Japan, foreslår 75 kg-CO₂/kWh og bekrefter disse tallene [107]. Siden det koster mye, og krever mye av miljøet å fremstille lithium-ion batterier, er det viktig å også avhende batteriene riktig. Det er flere metoder å avhende batterier

¹Kostnader er fordelt på togsettets levetid - 25 år

²Kostnader er fordelt på komponentets levetid - 75 år

³Kostnader er fordelt på komponentets levetid - 25 år

⁴Kostnader er fordelt på komponentets levetid - 4 år

⁵Kostnader er fordelt på ladestasjon levetid - 25 år

på. En metode er å kjøle materialet ned i flytende nitrogen. Deretter blir det mekanisk delt opp, og blandet med vann. Resultatet er hydrogen, lithiumhydroksid og kobolt. Denne prosessen vil ha et CO₂ utslipp på 6kg-CO₂/kWh [107]. For alle persontogene på Rørosbanen, med batteribytte hvert 4. år, vil dette tilsvare et årlig utslipp på omtrent 275 tonn CO₂. Ved å bruke nordisk stømmiks for å lade disse batteriene, vil det totale årlige CO₂ utslippet bli 690 tonn.

Når batteriene er brukt slik at de ikke lenger kan levere nok energi til togene, vil et tiltak for å utnytte disse være å sette dem i forbindelse med en ladestasjon. Disse batteriene vil fortsatt ha en relativt høy kapasitet i mange sykluser til, og kan bidra til at ladestasjonene trekker en jevnere belastning fra strømmettet rundt. Dette vil spare miljøet ved utnytte mye mer av batterienes levetid.

11.5 Datablad

Datablad batteri med EDLC			
Beskrivelse	Person	Gods (diesel)	Sum
Vekt togsett [tonn]	77	-	-
Energibruk [GWh/år]	3,3	7,3	10,6
CO ₂ -utslipp (norsk mix) [tonn/år]	760	2228	2988
NOX-utslipp [tonn/år]	0	29	29
Sum kostnader [mill. NOK/år]	69,2	26,5	95,7

Tabell 11.2: Datablad for batteri med EDLC

11.6 Fordeler og ulemper med batteri

11.6.1 Fordeler

En klar fordel med batterier er at det ikke er nødvendig med videre inngrep i naturen. Alle tunneler og planoverganger kan stå som de er i dag, og det visuelle bildet av naturen holdes intakt. Tog drevet av batterier forurensrer ikke lokalt, og støyer dessuten svært lite. Det er god utnyttelse av energi og stort potensiale i den videre utviklingen.

11.6.2 Ulemper

Produksjon av batteri står for den største delen av utslippet ved bruk av batteri. Med dagens tall er dette ikke konkurransedyktig på miljøsidene. Problemer tilknyttet lading kan være utfordrende, i ladepunktet vil det være en stor belastning på strømmettet, og dette må oppgraderes. Vekt og volum av batteriene som finnes i dag medfører økt energiforbruk og er uegnet til godstransport på grunn av plassbehov.

Kapittel 12

Resultater og sammenlikning

12.1 Innledning

I betraktningen av de fem forskjellige togsettene beskrevet over, har det kommet frem interessante resultater. I denne delen av prosjektoppgaven sammenliknes kostnader og miljøpåvirkning ved de forskjellige alternativene. Sammenlikningen gjøres separat for å gi et klarere bilde på både betydningen ved og bakgrunn for resultatene. På denne måten er det mulig for leseren å danne seg en oppfattning av miljøkonsekvensene, uavhengig av kostnadene, og motsatt. I konklusjonen kombineres resultater fra miljø- og kostnadsdelen for å gi et mer helhetlig bilde av resultatene fra prosjektarbeidet.

12.2 Kostnader

12.2.1 Investeringskostnader

12.2.1.1 Infrastruktur

Alle teknologiene innebærer en form for infrastrukturell utbygging. For elektrifisering er dette en omfattende konstruksjon som innebærer store kostnader. For de andre alternativene er det hovedsakelig mindre anlegg som strekker seg over en liten del av jernbanelinjen. LNG og hydrogen har fylleanlegg for gass, mens batteri har ladestasjon. Alle disse har en estimert kostnad i størrelsesorden 20 mill. NOK. For KL er den estimerte investeringskostnaden langt høyere, grunnet den storstilte utbyggingen. Det vil koste omlag 5 mrd. NOK å elektrifisere strekningen Hamar-Støren. Derfor er det ingen tvil om at KL har den største kostnaden knyttet til utbygging av infrastruktur.

12.2.1.2 Togsett

Investering knyttet til innkjøp av togsett har vært vanskelig å estimere. Kostnader for hver enkelt komponent er lagt til grunn og forsøkt overført til lokomotivet. Det vil være store usikkerheter i pris, spesielt for teknologier som krever mer utvikling. Løsninger

med KL og diesel er kjent teknologi som har vært tilgjengelig i mange år og forventes å kunne gjennomføres uten store økonomiske overraskelser. Man vil derimot kunne forvente ekstrakostnader knyttet til innkjøp av motorvognsett basert på de alternative teknologiene. Det er verdt å merke seg at batteri og brenselcelle må byttes før motorvognsettets levetid på 25 år. Kostnadene er oppsummert i tabell 12.1. Av tabellen ser man at estimert kostnad for togsett med hydrogen med EDLC er lavere enn LNG med EDLC. Dette sees imidlertid på som urealistisk, da LNG per dags dato er mer moden og gjennomførbar teknologi for tog enn hydrogen.

Kostnader togsett [mill. NOK/år]				
Diesel	Elektrisk togsett	LNG med EDLC	Hydrogen med EDLC	Batteri med EDLC
20,6	20,6	22,5	21,8	32,4

Tabell 12.1: Beregnet årlig pris for togsett

12.2.2 Kontinuerlige kostnader

12.2.2.1 Energiforbruk

Det er flere faktorer som påvirker energiforbruket. Faktorer som er vurdert i motorvognsettet er vekt og utnyttelsesgrad av energien. Forholdet mellom energiforbruket og vekten er tilnærmet proporsjonal og det er derfor gunstig å produsere et lett motorvognsett. Energiprisen vil naturlig nok også spille en stor rolle. I tabell 12.2 fremgår disse faktorene for alle persontogtyper.

	Kostnadsfaktorer for energi - persontog				
	Diesel	Elektrisk togsett	LNG med EDLC	Hydrogen med EDLC	Batteri med EDLC
Energipris [NOK/kWh]	0,88	0,48	0,35	1,29	0,48
Vekt [tonn]	80	65	81	69	77
Andel utnyttet energi ¹	0,33	1,35	0,55	0,67	1,27

Tabell 12.2: Energikostnader for ulike alternativer

I tabell 12.3 kan man se energikostnader for både person- og godstog. Det er klart at diesel og hydrogen er de mest kostbare alternativene. Da dagens dieselalternativ ikke har noen form for regenerering er det vanskelig å sammenlikne dette tallet med de andre. For de resterende togtypene ser vi at elektrisk togfremføring er det økonomisk mest gunstige alternativet, med LNG og batteri som gode utfordrere. Hydrogen har en svært høy energikostnad for persontog, og er ikke i stand til å konkurrere med diesel.

¹Dette er et forholdstall mellom nyttegjort energi i toget og energi hentet enten fra nettet eller drivstoff. Her er det viktig å legge merke til at fire teknologier bruker regenerering, noe som gjør det mulig med et høyere tall enn 1.

	Energikostnader (inkl. avgifter) [mill. NOK/år]				
	Diesel	Elektrisk togsett	LNG med EDLC	Hydrogen med EDLC	Batteri med EDLC
Person	11,2	1,4	3,0	11,5	1,6
Gods	6,3	1,4	2,7	6,3 ²	6,4 ³
Sum	17,6	2,8	5,7	17,8	7,9

Tabell 12.3: Energikostnader inkludert avgifter

12.2.2.2 Vedlikehold infrastruktur

Det vil være en kostnad i forbindelse med vedlikehold av infrastrukturen til alle teknologiene. Ved bruk av batteri må ladestasjonen vedlikeholdes. Ved bruk av LNG eller hydrogen blir det en kostnader for vedlikehold av tankanlegg. Sammenliknet med disse teknologiene har elektrifisering den klart største årlige vedlikeholdskostnaden, og vedlikeholdskostnader for de andre teknologiene har derfor blitt neglisjert. Utregninger viser at det vil koste omlag 48 mill. NOK årlig å vedlikeholde strekningen Hamar-Støren ved en eventuell elektrifisering.

12.2.2.3 Vedlikehold motorvognsett

Vedlikeholdskostnader knyttet til motorvognsettene er en dominerende post i de kontinuerlige kostnadene. Estimerte kostnader for alternativene elektrisk, diesel og LNG har størst troverdighet, mens usikkerhet rundt hydrogen- og batterilokene er større. Vedlikeholdskostnader knyttet til disse antas å være lave da systemene har færre bevegelige deler enn for eksempel diesel og LNG. Generelt sett har det blitt vurdert at diesel og LNG vil ligge på samme kostandsnivå, mens elektrisk togfremføring, batteri og hydrogen vil alle ha en lavere kostnad. Kostnadene er oppsummert i tabell 12.4.

	Vedlikeholdskostnader motorvognsett [mill. NOK/år]				
	Diesel	Elektrisk togsett	LNG med EDLC	Hydrogen med EDLC	Batteri med EDLC
Person	44,1	37,1	44,1	37,1	37,1
Gods	15,9	13,4	15,9	15,9	15,9
Sum	60,0	50,5	60,0	53,0	53,0

Tabell 12.4: Vedlikeholdskostnader for ulike alternativer

12.2.3 Totalkostnader

I tabell 12.5 kan man se en sammenligning av alle investeringskostnader, kontinuerlige kostnader og totalkostnader. Totalt skiller kontaktledningsalternativet seg ut med en høy kostnad, mens LNG er det minst kostbare alternativet.

²Godstransport foregår med dette alternativet ved hjelp av diesel

³Godstransport foregår med dette alternativet ved hjelp av diesel

	Totalkostnader [mill. NOK/år]				
	Diesel	Elektrisk togsett	LNG med EDLC	Hydrogen med EDLC	Batteri med EDLC
Investeringskostnader	20,6	87,2	22,8	22,6	34,8
Kontinuerlige kostnader	77,6	101,7	65,7	70,8	60,9
Totalkostnader	98,2	188,9	88,5	93,5	95,7

Tabell 12.5: Totalkostnader for de ulike alternativene

12.3 Miljø

Miljøkonsekvenser måles av svært ulike faktorer, og aktører har ulike interesser. De globale klimaendringene påvirkes av CO₂-utslippet, mens lokale bestander av fugler kan ta stor skade av nærmiljøutbygginger og utslipp. Det er derfor valgt å analysere miljøkonsekvensene i tre deler. Det sammenliknes først på CO₂-utslipp, deretter vurderes NO_X-, SO₂- og partikkelutslipp. Til slutt sammenliknes estetikk og påvirkning på lokal fauna.

12.3.1 CO₂-utslipp

Det knyttes årlige CO₂-utslipp til alle de fem alternative teknologiene. Vi ser av tabell 12.6 at diesel har det største årlige utslippet av CO₂. LNG ligger lavere, men man må også her legge merke til at alle alternativer utenom dagens diesel blir beregnet med regenerering.

For persontogene er det brenselcellealternativet som kommer best ut, mye grunnet antakelsen om norsk strømmiks ved produksjon av hydrogen. Denne antakelsen vil bli diskutert i seksjon 13.2.1. Kontaktledningsnettet vil også ha et svært lavt årlig CO₂ utslipp, men her er det en CO₂-investering i startfasen for å sette opp KL. Batteri skiller seg også ut med et lavt årlig CO₂-utslipp. I figur 12.1 vises CO₂-utslippene til de ulike teknologiene over 75 år.

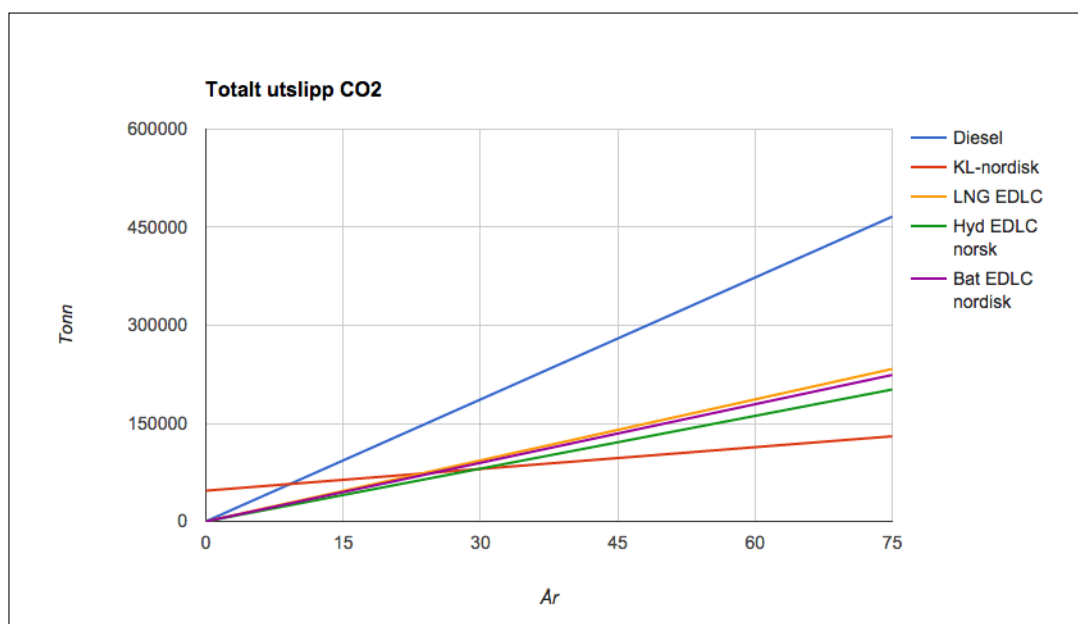
	CO ₂ -utslipp [tonn/år]				
	Diesel	Elektrisk togsett	LNG med EDLC	Hydrogen med EDLC	Batteri med EDLC
Person	3990	525	1628	463	690
Goods	2228	585	1482	2228	2228
Sum	6218	1110 ⁴	3110	2691	2988

Tabell 12.6: CO₂-utslipp for ulike alternativer

12.3.2 NO_x, SO₂, partikler

NO_X og andre partikkelutslipp har større konsekvenser for nærmiljøet enn for det globale klimaet. Her er det risiko for astma og andre luftveisrelaterte sykdommer, sur nedbør og påvirkning på lokalt plante-, dyre- og menneskeliv. Innholdet i drivstoffet og forbrenningstemperatur påvirker dette. Av teknologiene i denne rapporten, er det diesel og

⁴Utslipp i forbindelse med nyoppsett er ikke medregnet her



Figur 12.1: Totale CO₂-utslipp for de ulike alternativene

LNG som er aktuelle, da disse innebærer en forbrenning. LNG har en potensiell NO_x-reduksjon på 22% mot diesel, og ved innføring av EDLC reduseres forbruket og dermed utslippene ytterligere. SO₂ og partikler er ikke tilstede for andre enn diesel. NO_x-utslipp er oppsummert i tabell 12.7.

	NO _x -utslipp [tonn/år]				
	Diesel	Elektrisk togsett	LNG med EDLC	Hydrogen med EDLC	Batteri med EDLC
Person	51,7	0,0	9,5	0,0	0,0
Gods	29,1	0,0	8,7	29,1	29,1
Sum	80,8	0,0	18,2	29,1	29,1

Tabell 12.7: NO_x-utslipp for ulike alternativer

Batteri- og hydrogenalternativet, samt elektrisk togfremføring, kommer best ut av sammenlikningen av persontransport, da de har tilnærmet nullutslipp. Ser vi derimot på totale utslipp ved de ulike alternativene er det elektrisk togfremføring og LNG som kommer best ut, da hydrogen og batteri fortsatt må frakte gods ved hjelp av diesel. Det er noe NO_x-utslipp innbakt i den nordiske miksen, men dette kan neglisjeres. Ved bygging av elektrifisert linje, vil det forekomme utslipp av NO_x, men dette blir ikke tatt med i beregningene.

12.3.3 Estetikk og lokal fauna

Det er ikke enkelt å tallfeste denne miljøpåvirkningen. Mange av indikatorene er vanskelige å måle og er ofte basert på subjektive oppfatninger. Under denne kategorien faller dyredød, nærmiljøskader og estetiske inntrykk av infrastruktur og liknende.

KL har det største avtrykket i nærmiljøet da det må settes opp master omtrent for hver 60. meter, og bygges omformere og transformatorer. I tillegg til dette kommer eventuelle behov for serviceveier under konstruksjon. Når arbeidet er ferdig står man igjen med master og ledninger, som kan være lite estetisk. Det har også vært rapporter om dyredød i forbindelse med KL. Fugler kan ha problemer med å se linjen, noe som kan føre til at de flyr inn i den. Utbygging av infrastruktur er også en ytterligere forstyrrelse for dyr som lever rundt linjen. Ved å velge en teknologi som ikke benytter KL, vil man unngå dette problemet.

For hydrogen og LNG er det nødvendig å bygge tankanlegg til drivstoffet. Disse vil naturlig nok sette preg på sitt nærmiljø, men totalt sett vil dette være langt mindre skjemmende enn et KL-anlegg.

Kapittel 13

Diskusjon

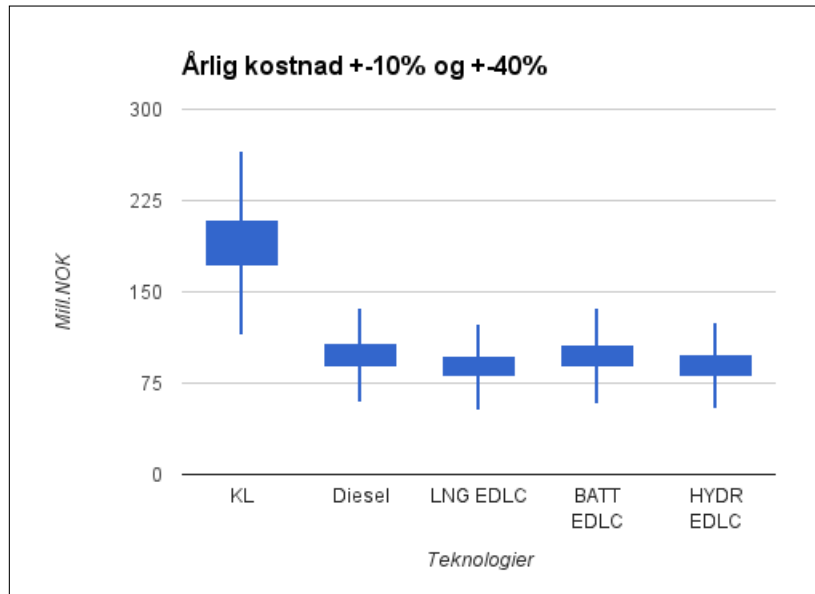
Gjennom denne oppgaven har vi sett på en rekke ulike teknologier for togfremføring, og sammenlignet deres samfunnsøkonomiske og miljømessige fordeler og ulemper. Vi vil i dette kapitlet diskutere resultatene fra våre funn, og se på mulige fremtidige kostnads- og miljøprofilendringer ved teknologiene.

På Rørosbanen er det svært lite trafikk sammenliknet med andre jernbanelinjer i Norge, det er derfor viktig å ta dette i betraktning ved overføring av resultater til andre strekninger. Trafikkgrunnlaget gjør derimot at strekningen er ideell som pilot-bane for alternative teknologier i drift.

13.1 Kostnader

13.1.1 Dagens kostnader

Det er usikkerhet rundt kostnadene som er lagt til grunn i denne rapporten. Figur 13.1 viser en sammenlikning der avvik i årlige kostnader på 10% og 40% kommer frem. Et eventuelt kostnadsavvik på -40% for KL og +40% på alternative teknologier gjør KL til et likeverdig alternativ på kostnadssiden. Det må da poengteres at dagens trafikkgrunnlag er lagt til grunn. Hvis elektriske motorvognsett er billigere i innkjøp og billigere i vedlikehold og drift, vil dette favorisere KL med økende trafikk. Tallene for batteri inneholder batteribytte hvert 4. år og vil med endrede forutsetninger og bedre utvikling kunne bli betydelig bedre.



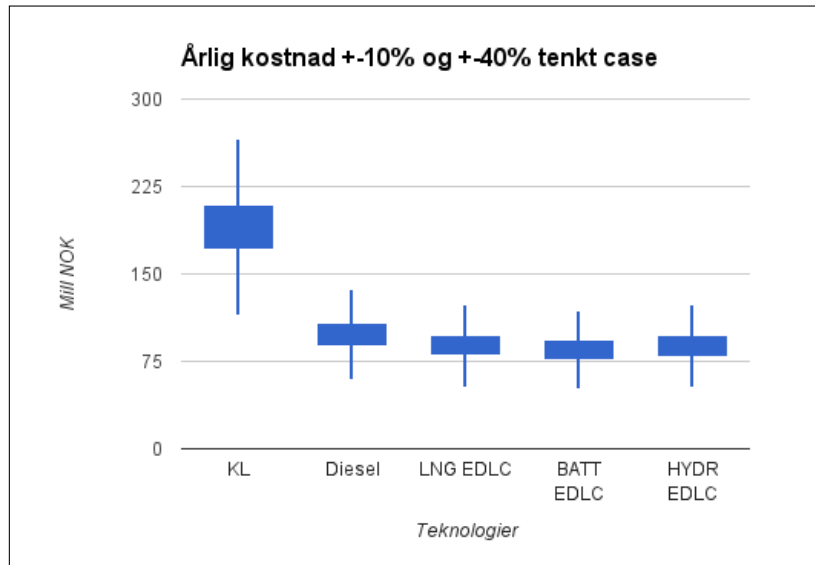
Figur 13.1: Kostnad for alternativene med ulike avvik

13.1.2 Fremtidige kostnader

I rapporten er det indikert en trend for kostnad i forbindelse med batteri og hydrogen. Hvis man antar at batteriet når en pris på $\frac{1}{3}$ av dagens om ti år, og antall sykluser økes med en faktor på 3 får vi situasjonen i figur 13.2. Der er også antatt en redusert kostnad på brenselcellesystemet ned mot $\frac{1}{3}$, samt en fordoblet levetid [88]. Det er antatt at LNG, diesel og KL-kostnader ikke vil endre seg merkbart de neste 10 årene.

Figur 13.1 sammenliknet med figur 13.2 viser at batteri vil ha den største kostnadsnedgangen av de fem alternative togteknologiene. Dette er mye grunnet den hyppige batteriutskiftningen i dag som kan gjøres sjeldenere og til en lavere kostnad i fremtiden. De antakelsene som er utregnet for fremtidsutsiktene til hydrogenkostnaden, viser små besparelser i forhold til batteri.

Det er ikke medberegnet en økt trafikkmengde for kostnadsanalysene. En eventuell økning i trafikkmengden vil gi en lineær økning i kostnader for de fleste alternativene. Elektrifisering er alternativet som skiller seg ut i denne sammenhengen, med både lavest energikostnader, og ingen investeringer i for eksempel batteri eller brenselcelle. Derfor vil elektrifisering kunne nærme seg de andre alternative teknologiene om trafikkmengden skulle øke. Batteri- og brenselcellealternativet vil skille seg ut med henholdsvis høye batterikostnader og høy energikostnad (hydrogen). Disse vil ha en lik økning sammenliknet med hverandre, men vil øke mer enn LNG og svært mye mer enn elektrifisering.



Figur 13.2: Kostnad for alternativene med ulike avvik 10 år frem i tid

13.2 Miljø

Det knyttes stor usikkerhet til tall og data for miljøpåvirkning, da noen av teknologiene ikke er utprøvd i togdrift. Derfor har det blitt gjort antakelser om hvordan utslipp vil være i togdrift. Det er forsøkt å finne et objektivt sammenlikningsgrunnlag, men tall for elektrifisering og diesel er veldig spesifisert og godt dokumentert, noe som ikke er tilfelle for de andre teknologiene.

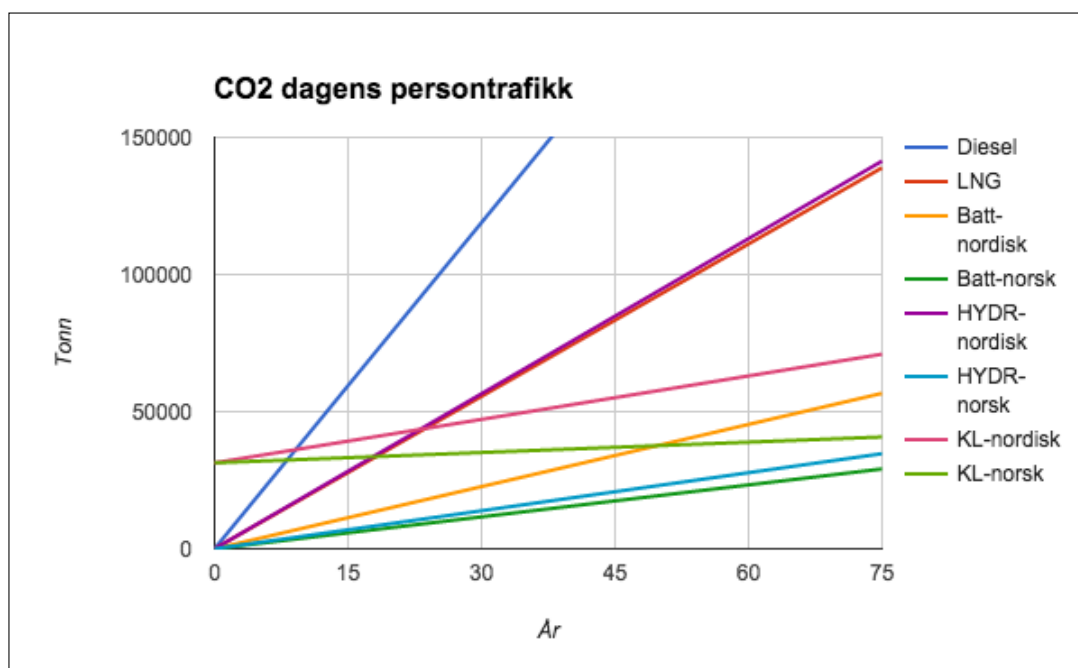
Som vist i seksjon 12.3 vil KL være gunstig for miljøet. I sammenlikningen for batteri- og hydrogenalternativet er det fortsatt brukt diesel som drivstoff for godstogene. Dette gir et reelt bilde av konsekvensene om man skulle valgt en teknologi i dag, men batteri- og hydrogenalternativet kan komme dårligere ut på grunn av dette. Derfor er det valgt å videre sammenlikne utelukkende persontrafikken for å lettere kunne vurdere de ulike teknologiene opp mot hverandre.

13.2.1 Dagens persontrafikk

I tidligere sammenlikning er det antatt ulike strømmikser for ulike teknologier. Dette kan være vanskelig å gjøre, og derfor er det i figur 13.3 en sammenlikning av alternativer med flere strømmikser.

For beregning av utslipp for persontrafikk er “investeringsutslippet” til KL justert ned med forholdet mellom person- og totaltrafikk. Dette er gjort for å vise hvor stor del av utslippet ved KL som kan knyttes mot persontrafikk, og gjør det mulig å sammenlikne KL på lik linje med de andre teknologiene.

Figur 13.3 viser hvilke CO₂-utslipp man kan forvente. Her kommer det tydelig frem



Figur 13.3: CO₂-utslipp med dagens persontrafikk med ulike strømmikser

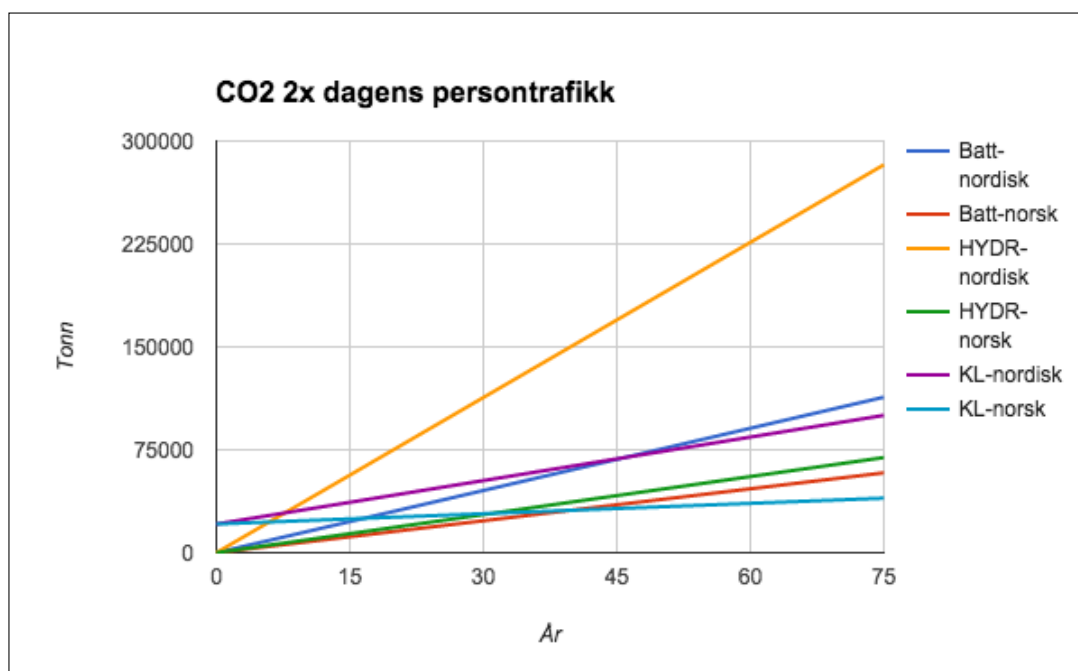
at hydrogen og batteri er svært fordelaktig dersom den produseres med norsk miks. Selv etter 75 års drift, vil ikke KL på tilsvarende strømmiks være bedre for miljøet. En interessant observasjon her er at dersom det brukes nordisk miks for å produsere hydrogen, vil det være et like dårlig alternativ som LNG. Batteritog vil ikke komme like dårlig ut av å lades med nordisk miks. Dette er mye grunnet en svært mye bedre virkningsgrad enn brenselcelleteknologien, om man tar hensyn til energikjeden (“well to wheel”). Fra et miljøperspektiv vil det antakelig ikke bli aktuelt å kjøre et hydrogentog, med mindre man har en garanti for at hydrogenet er produsert fra en isolert fornybar energikilde, satt opp eller øremerket til produksjon av hydrogen.

13.2.2 Økt persontrafikk

Et annet interessant tilfelle er å se på økt trafikk. I dag er det svært lav trafikk på Rørosbanen, omtrent $\frac{1}{10}$ av gjennomsnittet i resten av landet. Det kan tenkes at trafikken vil øke i fremtiden. Figur 13.4 viser CO₂-utslipp ved en dobling av energiforbruket for hver teknologi fra simulert persontrafikk. Her er hydrogentog på nordisk miks ekskludert da utslippet ville blitt svært høyt.

På norsk miks vil elektrifisering etter 75 år totalt sett begynne å lønne seg, og batteri vil kunne bli en vinner ved bedring av produksjonsvilkår.

Hydrogen har stort potensiale, men har en omfattende energikjede som gjør at utnyttet energi er lavere enn for eksempel for batteri. Teknologien som har best utvikling



Figur 13.4: CO₂-utslipp med to ganger dagens persontrafikk med ulike strømmikser

de neste årene vil kunne være med å prege jernbanen i lang tid fremover.

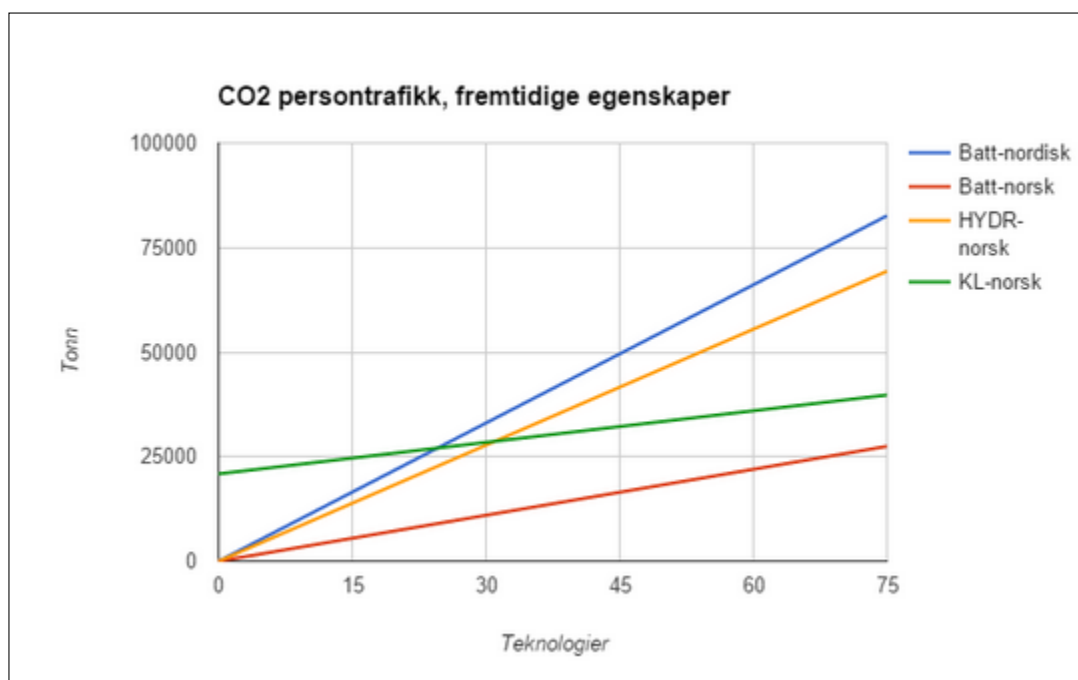
13.2.3 Fremtidige utslipp

Siden denne oppgaven dreier seg om en mulig fremtidig investering, er det aktuelt å vurdere fremtidige materiellegenskaper og utslippstall. At for eksempel batterier vil kunne ha en lengre levetid vil ikke bare være gunstig for kostnader, det vil også være positivt for miljøet. Også for hydrogenalternativet vil brenselcellene få lengre levetid. En sammenlikning av dette er gitt i figur 13.5.

Man ser at batterialternativet vil gjøre det godt med forbedrede egenskaper. Batteriteknologien på nordisk mikser vil nærme seg hydrogenalternativet på norsk mikser, da hydrogenalternativet vil ligge på et lignende nivå som i dag.

13.2.4 Overføring togmateriell

I dag er det to aktuelle ruter for togfremføring mellom Oslo og Trondheim. Hovedtrafikken går på Dovrebanen der linjen er elektrifisert. Hvis denne banen ikke er tilgjengelig, vil Rørosbanen være det eneste alternativet. Slik situasjonen er i dag, brukes det diesel på Rørosbanen og elektrisitet på Dovrebanen. To forskjellige teknologier på disse strekningene gjør at det er vanskelig å kompensere dersom Dovrebanen skulle være ute av drift. Man vil derfor trenge ekstra materiell for å ta seg av trafikken fra Dovrebanen.



Figur 13.5: CO₂-utslipp med dagens persontrafikk, gitt fremtidige teknologiegenskaper

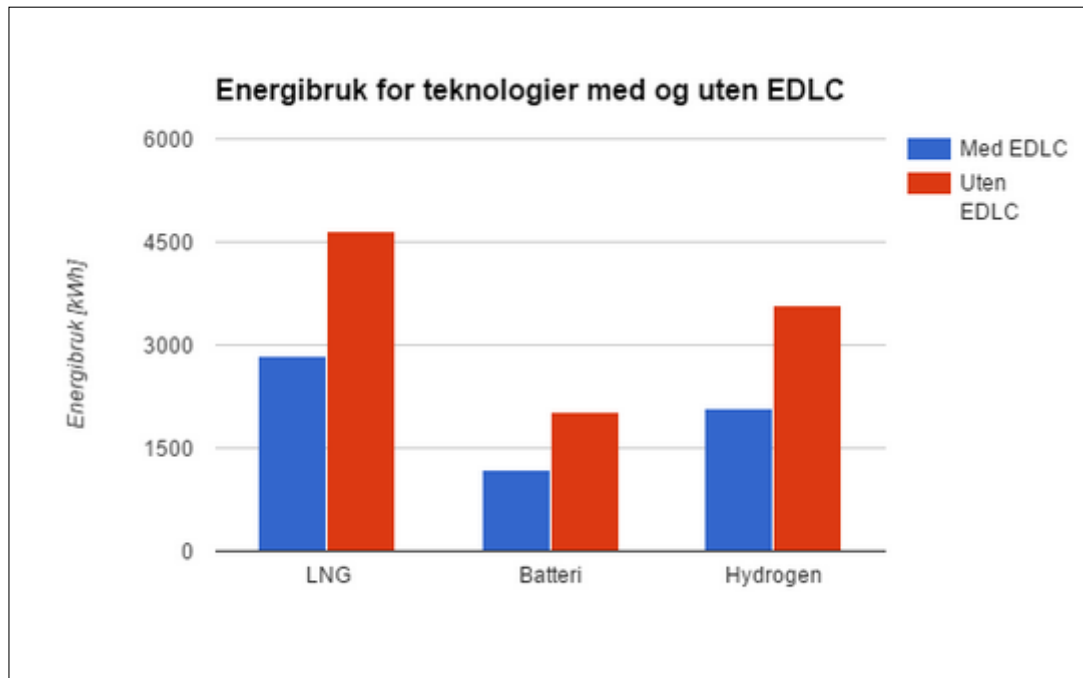
Det er ikke økonomisk å ha materiell stående som reserve for nedetid på banen. Dette kan være et argument for å ha kun én type teknologi i togfremføring og dermed ha muligheten til å overføre togsett mellom banene.

En mulig løsning kan være å bygge tog med dobbelt system der alternativ teknologi og pantograf er standard. Dette gjør at samme togsett kan benyttes uavhengig av om banen er elektrifisert eller ikke. Slik situasjonen er i Norge i dag med baner med og uten KL vil dette være interessant. Operatørene vil da ha mulighet for å ha én type materiell. Dette er bra for vedlikehold, rutiner og fleksibilitet i materialparken, men gir økt vekt og dermed høyere energiforbruk.

13.2.5 EDLC

Gjennom arbeidet med denne oppgaven, kom det frem at det er store fordeler knyttet til bruk av EDLC. Å kunne regenerere energi og spare drivstoff er aktuelt og interessant uansett teknologitype. Samtidig er det meget gunstig å kunne levere en konstant effekt fra energikilden som blir brukt til togfremføringen. Dette er ikke bare en fordel for brenselcelle- og LNG-tog, der energikilden kan dimensjoneres for $\frac{1}{3}$ til $\frac{1}{4}$ av energibehovet. Også for batterier er dette en stor fordel da man kan forlenge batteriets levetid ved å øke antallet sykluser batteriet tåler når man har en lav, jevn belastning. Dessuten vil EDLC avlaste batteriet slik at man kan redusere antallet sykluser et batteri bruker i løpet av et år. I figur 13.6 ser man mulig energibesparelsen som følge av å ha en EDLC

i de ulike alternativene.



Figur 13.6: Energiforbruk med og uten EDLC

EDLC er en ny teknologi og det er derfor knyttet usikkerhet ved bruk av denne. Det kan oppstå tilleggskostnader utover hva som er forventet. Det kan også oppstå uventede tekniske problemer. Mange bedrifter kan derfor være avventende med å satse på denne teknologien.

Mye av grunnlaget for resultatene er basert på at det er mulig å bruke en EDLC. Uten en energilagrinshenhet vil persontogene bruke mye mer energi, noe som gir store utslag i både miljø og kostnadsanalyser. Som et eksempel ville drivstoffutgiftene for hydrogenalternativet øke med omtrent 50%. Siden hydrogen er dyrt vil dette få store utslag i kostnadsberegningene. Et eksempel som påvirker miljøberegningene er at det uten bruk av EDLC vil bli en kraftig økning i brukt batterimengde per år, og det vil gi et mye høyere CO₂-utslipp.

Om man hadde utstyrt dagens dieseltog med EDLC, kan man anta tilsvarende forbedring som for LNG på kostnad og miljø. Dette kan også være et aktuelt alternativ, men det vil muligens bare være et mellomsteg til en ny teknologi. Videre arbeid vil også vise om kostnader og nytte gjengitt i denne rapporten er troverdig. I så fall kan en eventuell EDLC i dagens motorvogner gi netto økonomisk gevinst etter få år.

13.2.6 Kryssingsspor

Lengden av togstamme har ikke blitt diskutert i større grad i denne oppgaven. Dette er et viktig tema i Norge fordi man ofte kun har ett spor og derfor trenger kryssingsspor. Hvis man skulle tatt for seg denne problematikken måtte man analysert rutenett og rutetabeller for Rørosbanen, og funnet ut hvor det er mulig å ha kryssende tog på strekningen Hamar-Støren. De forskjellige teknologiene vil kunne føre til økt lengde av toget. For persontogsettene antar vi at dette ikke vil være et problem, da de nye teknologiene vil tilføre minimal ekstra lengde på persontog. Hvis et godstog skal ha nok energi med dagens batteriteknologi, er det ikke utenkelig at det går på bekostning av nyttelast og lengde. LNG vil ha behov for større tank enn diesel, noe som vil gjøre et godstog lengre.

Forskere har konkludert med at batteriteknologien i fremtiden kommer til å ha en 3-10 ganger høyere spesifikk energi enn dagens batterier. Skulle dette bli realiteten og batteriene blir 10 ganger lettere vil problematikken knyttet opp mot vekt for godstog være løst. For hydrogenalternativet kan også vekten av godstogene bli lettere i fremtiden da brenselceller og hydrogentanker vil bli lettere. Dette avhenger av teknologiske fremskritt, og for hydrogentanken er det spesielt viktig at det blir gjort fremskritt innen materialteknologi.

13.3 Samfunnsnytte

I denne oppgaven er det presentert en rekke beregninger av kostnader og miljøpåvirkning for de ulike togfremføringsteknologiene. Investeringer i ny infrastruktur er en av de største enkeltutgiftene et land har, og det er derfor sentralt at man tar et velinformert valg. Det er vist at elektrifisering er et svært kostbart alternativ, og man bør derfor vurdere hvorvidt det er samfunnsøkonomisk forsvarlig å bygge ut KL-anlegg på Rørosbanen. Alternativet vil være å vente på at en av de alternative teknologiene i denne rapporten blir moden nok til at den kan tas i bruk kommersielt.

Som det ble pekt på i innledningen er miljøhensyn høyst relevant når man skal se på samfunnsnyttene av togteknologi. Samfunnet opplever allerede i dag store kostnader grunnet naturkatastrofer, og det forventes at disse utgiftene vil øke dramatisk i takt med klimaendringene. En reduksjon i nasjonale utslipp vil være med på å begrense klimaendringene og tilhørende konsekvenser. Her har vi sett at elektrifisering er det beste alternativet. Dette er også en teknologi som er klar nå, og som vil gjøre det mulig å ta forurensende dieseltogsett av linjene så raskt som mulig.

Det må gjøres en avveining mellom de samfunnsøkonomiske kostnadene ved å bygge ut kontaktledningsnett, og kostnadene ved å vente med å erstatte dieseltogsett som forurenses sterkt. Dette vil kreve grundig forskning, men vil også bli en politisk avgjørelse.

Kapittel 14

Konklusjon og videre arbeid

14.1 Konklusjon

Utgangspunktet for denne prosjektrapporten var å finne ut om det finnes alternativer til elektrifisering av Rørosbanen med konkurransedyktig kostnads- og miljøprofil. Resultatene viser at de alternative teknologiene har omtrent like totalkostnader, men alle har klart lavere kostnadsprofil enn elektrifisering. Av de ulike alternativene er det LNG som har best samfunnsøkonomisk profil. Elektrifisering er best for miljøet over en 75-års periode med de antakelser som er lagt til grunn, men både batteri- og hydrogenalternativene har konkurransedyktige miljøprofiler hvis all trafikk benytter seg av dette alternativet.

Det har kommet tydelig frem at trafikkgrunnet har stor påvirkning på både kostnad og miljø for de ulike alternativene. Det vil i hovedsak være gunstig for elektrifisering med en høyere trafikk på strekningen. Batteri- og brenselcelle-alternativene derimot vil, relativt sett, ikke ha en like god miljø og kostnadsprofil ved økt trafikkmengde.

Type energi som brukes for å produsere hydrogen, lade batteri eller drive elektriske tog er svært viktig for miljøprofilen til disse teknologiene. Definisjon av hvilken strømmiks som er i det norske kraftnettet vil derfor ha stor innvirkning på resultatene. I utgangspunktet har batteri og KL stort potensiale da de har høye virkningsgrader.

Det at LNG er en fossil energikilde, gjør at alternativet får en ugunstig miljøprofil. For miljøet er det bedre å bruke LNG enn diesel, men på sikt vil dette ikke være aktuelt i Norge.

I fremtiden vil det kunne være mye utvikling av hydrogenteknologi, og kanskje spesielt batteriteknologi. Dette gjør at både hydrogen og batteri vil få en bedre kostnads- og miljøprofil i løpet av levetiden til et eventuelt kontaktledningsnett. Det mest ugunstige alternativet vil være å fortsette dagens dieseldrift.

EDLC er en viktig del av de alternative teknologiene da teknologien gir mange fordeler. Det spares energi, og tilrettelegger blant annet for optimal dimensjonering av drivenheter i lokomotivene. Bruk av EDLC har derfor påvirket resultatene betraktelig både for kostnader og miljø.

14.2 Videre arbeid

I arbeidet med denne rapporten har det blitt tydelig at å finne en utfordrer til togsett som går på KL er en krevende prosess. Det er svært vanskelig å beregne kostnader for togtyper som kun eksisterer i teorien. Her trengs det både konkret forskning på hva slags kombinasjoner av drivkraft som er mest hensiktsmessig, og hvor godt dette passer til den spesifikke jernbanelinjen.

Gruppen hadde et ønske om å se på mulighetene for deelektrifisering av linjer. Dette ble ikke gjort på grunn av oppgavens arbeidsmengde. Her er det muligheter for å redusere batterimengde i togene, evt. redusere slitasje på batteriene. Elektrifiserer man f.eks. store stigninger på linjen kan dette være en stor bidragsyter til å redusere kostnaden og kompleksiteten til togsettene.

Det er stor usikkerhet rundt estimer i rapporten og det anbefales å gjennomføre en sensitivitets- og usikkerhetsanalyse. Svinghjul kan også kombineres med de forskjellige teknologiene for å optimalisere hybridløsninger.

Lengden av togstammen har ikke blitt diskutert i større grad i denne oppgaven og en analyse av lengde på motorvogner i forhold til de alternative teknologien kan være et forslag til videre arbeid.

Dersom man velger å innføre en ny teknologi på det norske linjenettet må man vurdere hvorvidt man skal beholde kontaktledningsnettet på de allerede elektrifiserte strekningene. KL-anlegget har store vedlikeholdskostnader, og togoperatørene ønsker et homogent banenett. Dette taler for at det er nødvendig å utrede en utfasing av KL-anlegget.

Bibliografi

- [1] (2015) Kyotoavtalen. [Online]. Available: <http://www.miljostatus.no/Tema/Klima/Klima-globalt/Globale-utslipp-av-klimagasser/Kyotoavtalen/>
- [2] (2015) Gøteborgprotokollen. [Online]. Available: <http://www.miljostatus.no/Tema/Luftforurensning/Goteborgprotokollen/>
- [3] (2015) Passasjertrafikken på tog kan femdobles. [Online]. Available: <http://www.nrk.no/trondelag/nsb-trygler-om-elektrifisering-1.11687746>
- [4] J.E.W. Toutain, G. Taarneby og E. Selvig, “Energiforbruk og utslipp til luft fra innenlandsk,” 2008.
- [5] (2015) Foreslår hydrogentog på Nordlandsbanen. [Online]. Available: <http://www.tu.no/bygg/2013/03/26/foreslar-hydrogentog-pa-nordlandsbanen>
- [6] (2015) Jernbanen i tall. [Online]. Available: <http://www.jernbaneverket.no/no/Jernbanen/Jernbanen-i-tall/>
- [7] A.E. Aaberge og L. Lund, “Elektrifisering av Rørosbanen,” NSB Bane, Region Nord, Tech. Rep., 2014.
- [8] “Miljørapport for NSB Persontog,” NSB, 2013.
- [9] “Epostutveksling med Erlend Rehn.”
- [10] Kjetil Johnsen. (2015) Materiell. [Online]. Available: <http://www.johnsern.com/materiell/index.htm>
- [11] Erik Halland, “Materiellfornyelser,” CargoNet, 2007. [Online]. Available: <http://www.njsforum.com/no/Presentasjoner/071119-NJS-Materiellseminar-CargoNet.pdf>
- [12] Norsk Petroleumsinstitutt. (2015) Priser på oljeprodukter. [Online]. Available: <http://www.np.no/priser/>
- [13] (2015) Veibruksavgift på drivstoff. Finansdepartementet. [Online]. Available: <https://www.regjeringen.no/nb/tema/okonomi-og-budsjett/skatter-og-avgifter/avgifter-pa-drivstoff-bensin-og-autodies/id558366/>
- [14] (2015) Kort om NOX-avgiften. Tollvesenet. [Online]. Available: <https://www.toll.no/no/bedrift/saravgifter-og-gebyrer/nox-avgift/kort-om-nox-avgiften/>
- [15] *Emission Standards*, European Union Std., 2015. [Online]. Available: <https://www.dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php>
- [16] “Personlig kommunikasjon med Stig Erik Rolfsen,” april 2015.
- [17] Iain Staffell, “The Energy and Fuel Data Sheet,” University of Birmingham, mars 2011. [Online]. Available: http://wogone.com/science/the_energy_and_fuel_data_sheet.pdf
- [18] Morten Simonsen, “Bensin og Diesel,” Vestlandsforskning, 2009. [Online]. Available: http://sip.vestforsk.no/pdf/Felles/Bensin_diesel.pdf
- [19] “Miljøregnskap,” NSB - Konsernet, 2012.

- [20] "Health Effects of Diesel Exhaust," Office of Environmental Health Hazard Assessment og American Lung Association of California.
- [21] (2011, Januar) Slik fungerer jernbanen. Jernbaneverket. [Online]. Available: http://www.jernbaneverket.no/PageFiles/13736/slikfungererjernbanen_2011.pdf
- [22] K.M.Kim, K.T.Kim og M.S.Han, "A Model and Approaches for Synchronized Energy Saving in Timetabling," Korea Railroad Research Institute, 2011. [Online]. Available: http://www.railway-research.org/IMG/pdf/a4_kim_kyungmin.pdf
- [23] (2015) Thamshavnbanen. Orkla Industrimuseum. [Online]. Available: <http://www.oi.no/historie/thamshavnbanen/>
- [24] (2014, desember) Slik fungerer jernbanen. Jernbaneverket. [Online]. Available: <http://www.jernbaneverket.no/no/Jernbanen/Jernbanedrift---eit-komplisert-samspel/>
- [25] "Elektrifisering av jernbanestrekninger hvor det i dag kun er dieseldrift," Jernbaneverket, November 2009. [Online]. Available: http://www.vegvesen.no/_attachment/125313/binary/240442?fast_title=Elektrifisering+av+jernbanestrekninger+hvor+det+i+dag+kun+er+dieseldrift+%28notat%29
- [26] (2015, april) Energiforbruk til togfremføring. Jernbaneverket. [Online]. Available: <http://www.jernbaneverket.no/no/Jernbanen/Miljo/Miljopavirkning/Energiforbruk/>
- [27] (2013, mars) Årsrapport - 2013. Jernbaneverket. [Online]. Available: <http://www.jernbaneverket.no/PageFiles/29735/%C3%85rsrapport%202013%20JBV.pdf>
- [28] Astrid Liv Busengdal, "Miljøhensyn i jernbanesektoren," Jernbaneverket, mars 2015.
- [29] Tone Norløff, "Trafikkavvikling og punktlighet," Jernbaneverket, januar 2015.
- [30] "Incremental Operations and Maintenance Cost Estimates," Metrolinx, Desember 2010. [Online]. Available: http://www.gotransit.com/electrification/en/current_study/Appendix%20Files/Appendix%208C.pdf
- [31] Prof. J.P. Baumgartner, "Prices and Costs in the Railway Sector," École Polytechnique Fédérale de Lausanne, januar 2001. [Online]. Available: http://www.webmail.transporeconomics.net/resources/Costing-%28rail%29/Baumgartner_Couts_chf_2001_e.pdf
- [32] Johan Anton Wikander, Jernbaneverket, 2015, Muntlig kilde.
- [33] Jernbaneverket, "Grønne spor i Trøndelag," juni 2014, Dokumentnummer: IUP-00-A-04919.
- [34] "Power Statistics," Union of the Electricity Industry – EURELECTRIC, 2010. [Online]. Available: http://www.eurelectric.org/media/44323/powerstats2010synopsis_final-2010-180-0002-01-e.pdf
- [35] (2015) Vannkraft. Statkraft. [Online]. Available: <http://www.statkraft.no/energikilder/vannkraft/>
- [36] (2012, august) Sør-Norge og to ny kabler innen 2021. Statkraft. [Online]. Available: http://www.statnett.no/PageFiles/7166/Dokumenter/S%C3%B8r-Norge%20og%20to%20nye%20kabler%20innen%202021_off_sept.pdf
- [37] Jernbaneverket, "Grønne spor i Trøndelag - Miljøbudsjett," mai 2014, Dokumentnummer: IUP-00-A-04918.
- [38] "Evaluation of Energy Efficiency Technologies for Rolling Stock and Train Operation of Railways," International Union of Railways, mars 2003.
- [39] (2015, april) Moment of Inertia of Flywheel. Amrita University. [Online]. Available: <http://vlab.amrita.edu/?sub=1&brch=74&sim=571&cnt=1>
- [40] P. Batty, R. Palacin, A. González-Gil, J.Powwel, "Energy efficiency in railways," NewRail – Centre for Railway Research, Newcastle University, 2014, Se tabell 1. [Online]. Available: http://tra2014.traconference.eu/papers/pdfs/TRA2014_Fpaper_19900.pdf

- [41] R. Díaz, “Electrochemical Energy Storage Technologies and Applications,” Electrochemical Processes Unit, IMDEA Energy Institute, Madrid, 2014.
- [42] S. Schoenung. (2011, april) Energy Storage Systems Cost Update. Sandia National Laboratories. [Online]. Available: <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2011/112730.pdf>
- [43] “Electrochemical Double Layer Capacitors: Supercapacitors 2014-2024,” desember 2014.
- [44] Y. Liu, C. Farnell, J.C. Balda, H.A. Mantooth, “Topology, Cost and Efficiency Comparisons of a 2 MW DC Supply Using Interleaved DC-DC Converter,” National Center for Reliable Electric Power Transmission, Department of Electrical Engineering - University of Arkansas, 2014. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6878695&tag=1>
- [45] (2015, april) NextFuel™ Natural Gas Retrofit Kit with Dual Fuel Technology. GE Transportation. [Online]. Available: <http://www.getransportation.com/locomotives/locomotives/nextfuel>
- [46] “Fact sheet - Bergen C26:33L Gas Engine,” Rolls Royce, Oktober 2013.
- [47] (2015, april) Om LNG og naturgass. Barents NaturGass. [Online]. Available: <http://www.bng.no/om-lng-og-naturgass.html>
- [48] (2015, april) About natural gas. International Energy Agency. [Online]. Available: <http://www.iea.org/topics/naturalgas/>
- [49] “Are we entering a golden age of gas? - World energy outlook,” International Energy Agency, 2011. [Online]. Available: http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebiste/2011/WEO2011_GoldenAgeofGasReport.pdf
- [50] W. Vantuono. (2015, april) LNG power: A history lesson. RailwayAge. [Online]. Available: <http://www.railwayage.com/index.php/blogs/william-vantuono/lng-power-a-history-lesson.html>
- [51] “Training trains to run on natural gas,” GEREports, november 2014. [Online]. Available: <https://gereports.ca/training-trains-run-natural-gas/>
- [52] “Diesel and gas engiens,” Rolls Royce, 2012. [Online]. Available: <http://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/customers/marine/diesel-gas-engines-brochure.pdf>
- [53] (2015, april) LNG som drivstoff for Nordlandsbanen. Norsk Gassforum. [Online]. Available: <http://www.gassforum.no/news.asp?id=14012&c=471&t=1384>
- [54] Per Magne Einang, “Om bruk av naturgass i transportsektoren,” SINTEF. [Online]. Available: <http://www.stfk.no/upload/documents/Internett/Tjenester/Veg,%20transport%20og%20lyver/Gass%20i%20transportsektoren/Naturgass%20vs%20diesel.pdf>
- [55] “Costs and benefits of LNG as ship fuel for container vessels,” Germanischer Lloyd, juli 2013. [Online]. Available: http://www.gl-group.com/pdf/GL_MAN_LNG_study_web.pdf
- [56] (2014, april) Liquefied natural gas shows potential as a freight locomotive fuel. U.S. Energy Information Administration. [Online]. Available: <http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=15831>
- [57] “Et bedre fungerende LNG-marked,” Næringslivets NOx-Fond, juni 2013. [Online]. Available: <https://www.nho.no/siteassets/nhos-filer-og-bilder/filer-og-dokumenter/nox-fondet/hovedside-nox-fondet/les-mer/presentasjoner-og-rapporter/et-bedre-fungerende-lng-marked-24.06.13.pdf>
- [58] Ingrid Marie Vincent Andersen, “Emissions from Ship Machinery,” april 2012. [Online]. Available: <http://www.greenship.org/fpublic/greenship/dokumenter/Emission%20wiki%20MAGA/Ship%20Emissions%20notes.pdf>
- [59] Ola Myrset. (2014, august) Fjord Line bygger ny LNG-tank i Hirtshals. SYSLA. [Online]. Available: <http://www.sysla.no/2014/08/12/maritim/fjord-line-bygger-ny-lng-tank-i-hirtshals/>

- [60] (2015, april) Energikalkulator. Teknisk Ukeblad. [Online]. Available: <http://energilink.tu.no/no/>
- [61] (2015, april) How much carbon dioxide is produced when different fuels are burned? U.S. Energy Information Administration. [Online]. Available: <http://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=73&t=11>
- [62] H. Paradowski, J. Launois, “How to reduce CO₂ emissions from the LNG chain,” mai 2002.
- [63] P. Forster, V. Ramaswamy, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, 2007, ch. 2. [Online]. Available: <https://www.ipcc-wg1.unibe.ch/publications/wg1-ar4/ar4-wg1-chapter2.pdf>
- [64] (2015, april) About Vehicle Projects. Vehicle Projects inc. [Online]. Available: <http://www.vehicleprojects.com/proj.html>
- [65] (2015, april) New Aruba streetcar shows off improved downtown. [Online]. Available: <http://www.caribbeannewsnow.com/headline-New-Aruba-streetcar-shows-off-improved-downtown-23195.html>
- [66] (2015, april) Emaar Launches Dubai Trolley, New Tram System In Downtown Dubai. [Online]. Available: <http://gulfbusiness.com/2014/12/emaar-launches-dubai-trolley-new-tram-system-downtown-dubai/#.VTn-Q62eAXD>
- [67] A. Hoffrichter, P. Fisher, J. Tutcher, S. Hillmansen og C. Roberts, “Performance evaluation of the hydrogen-powered prototype locomotive ‘Hydrogen Pioneer’,” *Journal of Power Sources*, vol. 250, mars 2014. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775313018004>
- [68] (2015, april) Liquid Hydrogen—the Fuel of Choice for Space Exploration. NASA. [Online]. Available: http://www.nasa.gov/topics/technology/hydrogen/hydrogen_fuel_of_choice.html
- [69] “Spesifikk impuls,” Store Norske Leksikon, april 2015. [Online]. Available: https://snl.no/spesifikk_impuls
- [70] J. Larminie, A. Dicks, *Fuel cell systems explained*. J. Wiley, 2003.
- [71] C. Stiller, U. Bünger, S. Møller-Holst, A.M. Svennson, K.A.Espegren og M. Nowak, “Pathways to a hydrogen fuel infrastructure in Norway,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, pp. 2597–2601, 2010. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319909004959>
- [72] (2015, april) Hydrogen - Produksjon. Fornybar.no. [Online]. Available: <http://www.fornybar.no/andre-teknologier/hydrogen/produksjon>
- [73] (2015, april) Hydrogen fra vann. Forskningsrådet. [Online]. Available: http://www.forskningsradet.no/prognett-hydrogen/33_Hydrogen_fra_vann/1234130630483
- [74] (2015, april) Technical Data — NEL A-series. NEL Hydrogen. [Online]. Available: <http://www.nel-hydrogen.com/technical-data/>
- [75] (2015, april) SILYZER systeme. Siemens. [Online]. Available: <http://www.industry.siemens.com/topics/global/en/pem-electrolyzer/silyzer/silyzer-systems/Pages/silyzer-systeme1105-9496.aspx>
- [76] (2011, desember) Vattenfall converts wind energy to hydrogen gas. Vattenfall. [Online]. Available: <http://corporate.vattenfall.com/news-and-media/news/news-imported/vattenfall-converts-wind-energy-to-hydrogen-gas/>
- [77] S. Møller-Holst. (2014, mai) Hydrogen; produksjon og bruk. [Online]. Available: <http://www.stfk.no/Documents/klima/fossilfireregion/Hydrogen%20prod%20og%20forbr%20i%20Midt-Norden%20Steffen%20Moller-Holst%2020140508.pdf>
- [78] (2013, mars) Vil produsere hydrogen fra vindkraft. Teknisk Ukeblad. [Online]. Available: <http://www.tu.no/kraft/2013/03/28/vil-produsere-hydrogen-fra-vindkraft>

- [79] K. Harrison, M. Peters. (2014, Juni) Renewable Electrolysis Integrated System Development & Testing - Presentation. National Renewable Energy Laboratory. [Online]. Available: http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review14/pd031_harrison_2014_o.pdf
- [80] K. Harrison, M. Peters, C. Ainscough. (2013) Renewable Electrolysis Integrated System Development & Testing - Presentation. National Renewable Energy Laboratory. [Online]. Available: http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/progress13/ii_a_2_harrison_2013.pdf
- [81] A. Hoffrichter, A.R. Miller, S. Hillmansen og C. Roberts, “Well-to-wheel analysis for electric, diesel and hydrogen traction for railways,” *Transportation Research*, vol. 17, pp. 28–34, januar 2012. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920911001106>
- [82] A.R. Miller, K.S Hess, D.L. Barnes og T.L. Erickson, “System design of a large fuel cell hybrid locomotive,” *Journal of Power Sources*, vol. 173, pp. 935–942, november 2007. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775307015856>
- [83] (2010, februar) PEM Fuel Cell Product Portfolio. Ballard Power Systems. [Online]. Available: <http://pdf.directindustry.com/pdf/ballard/pem-fuel-cell-product-portfolio/22779-160251.html>
- [84] (2015, april) Generelt om stasjonene. HYOP. [Online]. Available: <http://hyop.no/stasjonene/>
- [85] (2004, juni) High-Pressure Hydrogen Storage System. Quantum Fuel Systems Technologies Worldwide, Inc. [Online]. Available: http://www.pnl.gov/fuelcells/docs/summits/summit8/presentations/day2/abele_915am.pdf
- [86] M. Løhre. (2014, september) Har gått med underskudd i to år for å betjene 20 hydrogenstasjoner. E24.no. [Online]. Available: <http://e24.no/bil/e24-bedrift/har-gaatt-med-underskudd-i-to-aar-for-aa-betjene-20-hydrogenbiler/23252932>
- [87] J. Genovese, K. Harg, M. Paster og Dr. J. Turner. (2009, september) Current State-of-the-Art Hydrogen Production Cost Estimate Using Water Electrolysis. National Renewable Energy Laboratory. [Online]. Available: <http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/46676.pdf>
- [88] “Steffen Møller Holst,” 2015, Personlig kommunikasjon.
- [89] Dr. C. Guzy, “ZBus Regulation and Technology Summit,” september 2013. [Online]. Available: http://www.arb.ca.gov/msprog/bus/zbus/workshop/2b_Guzy.pdf
- [90] J. Spendelow og J. Marcinkoski. (2013) Fuel Cell System Cost - 2013. U.S. Department of Energy. [Online]. Available: http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/14012_fuel_cell_system_cost_2013.pdf
- [91] A. Demirbas, *Biohydrogen*. Springer, 2009, ch. 10.
- [92] S.R. Dhanushkodi, N. Mahinpey, A. Srinivasan og M. Wilson, “Life Cycle Analysis of Fuel Cell Technology,” *Journal of Environmental Informatics*, vol. 11, pp. 36–48, 2008. [Online]. Available: <http://www.iseis.org/jei/fulltext.asp?no=200800109>
- [93] (2012, februar) EIA projects U.S. non-hydro renewable power generation increases, led by wind and biomass. U.S. Energy Information Administration. [Online]. Available: <http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=5170>
- [94] G. Pistoia, *Lithium-Ion Batteries*, 1st ed. Elsevier, 2014.
- [95] “Datablad NCR18650B,” Panasonic, 2012. [Online]. Available: <http://industrial.panasonic.com/lecs/www-data/pdf2/ACA4000/ACA4000CE417.pdf>
- [96] H. Budde Meiwes, J. Drillkens, B. Lunz, J. Muennix, S. Rothgang, J. Kowal og D.U. Sauer, “A review of current automotive battery technology and future prospects,” *Journal of Automobile Engineering*, vol. 227, pp. 761–766, 2013. [Online]. Available: <http://pid.sagepub.com/content/227/5/761.abstract>

- [97] B. Scrosati og J. Garche, “Lithium batteries: Status, prospects and future,” *Journal of Power Sources*, vol. 195, pp. 2419–2430, mai 2010. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775309020564>
- [98] B. Scrosati, J. Hassoun og Y-K. Sun, “Lithium-ion batteries. A look into the future,” *Energy & Environmental Science*, vol. 5, pp. 3287–3295, juli 2011. [Online]. Available: <http://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2011/ee/c1ee01388b>
- [99] J. Gartner. (2010, januar) The EV Conundrum: Uncertain Resale Value Complicates Li-ion Battery Market. [Online]. Available: <https://www.navigantresearch.com/blog/the-ev-conundrum-uncertain-resale-value-complicates-li-ion-battery-market>
- [100] (2015, april) A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis. European Climate Foundation. Kilde hentet på dato, prod.dato ikke spess.
- [101] (2014, september) Energy Darwinism II — Energy Storage: Game Changer for Utilities, Tech & Commodities. CitiBank. [Online]. Available: <https://ir.citi.com/UAXL%2F1gNFctVBgY9Y%2BYI2AVo44t83FCcT4CS6TgoRho8dllkm1tZOw==>
- [102] (2014) Advanced Batteries for Utility-Scale Energy Storage. Navigant Research. [Online]. Available: <https://www.navigantresearch.com/research/advanced-batteries-for-utility-scale-energy-storage>
- [103] A. Næss. (2014, august) En sjøens Tesla. Maritimt Forum. [Online]. Available: <http://maritimt-forum.no/stavanger/en-sjoens-tesla/>
- [104] B. Payne. (2014, april) All Electric, Battery Powered Ferry. EESImarine. [Online]. Available: <http://eesimarine.com/battery-powered-ferry-feasibility-study/>
- [105] (2015, april) Litium - Fremstilling. Store Norske Leksikon. [Online]. Available: <https://snl.no/litium#menuitem3>
- [106] T.R. Hawkins, B. Singh, G. Majeau-Bettez og A. Hammer Strømman, “Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles,” *Journal of Industrial Ecology*, vol. 17, pp. 53–64, februar 2013. [Online]. Available: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x/full>
- [107] K. Ishihara, N. Kihira, N. Terada og T. Iwahori, “Environmental Burdens of Large Lithium-Ion Batteries Developed in a Japanese National Project,” Central Research Institute of Electric Power Industry, 2015. [Online]. Available: <https://www.electrochem.org/dl/ma/202/pdfs/0068.PDF>
- [108] (2015, februar) Overbygning/Prosjektering/Sporets trasé. Jernbaneverket. Data hentet fra revisjon 27. feb. 2015 kl. 16:42. [Online]. Available: https://trv.jbv.no/wiki/Overbygning/Prosjektering/Sporets_tras%C3%A9
- [109] C. Cole, *Handbook of Railway Vehicle Dynamics*. Tayler & Francis, 2006, ch. 9. [Online]. Available: http://sci-lib.org/books_1/I/iwnicki_01_09.pdf
- [110] M. Markowitz. (2013, april) Wells to wheels: electric car efficiency. [Online]. Available: <https://matter2energy.wordpress.com/2013/02/22/wells-to-wheels-electric-car-efficiency/>
- [111] A. Hoffrichter, Dr. A.R. Miller, Dr. S. Hillmansen og prof. C. Roberts, “Well-To-Wheel Analysis for Electric, Diesel, and Hydrogen Traction for Railways,” september 2001. [Online]. Available: http://www.arnoldrmiller.net/docs/WTW_06092011.pdf

Vedlegg A

Simulering

A.1 Matlabscript

Matlab(r) ble benyttet til å modellere togfremføringen på Rørosbanen ved hjelp av forward euler. Først ble det programmert en kode for å lese inn data fra løfteskjemaet. Deretter ble det lagt opp til å kjøre beregning av krefter 5 ganger i sekundet for å finne hastighet og posisjon. Samtidig ble alle krefter i modellen for togfremføringen beregnet, og data som effekt brukt på høyde, akselerasjon, friksjon osv ble lagret. En PI regulator ble programmert inn til å være lokfører. Denne prøvde å styre gasspådrag og brems for å holde en gitt hastighetsprofil.

A.2 Modell

A.2.1 Banegeometri

For å få til en simulering av togfremføring på Rørosbanen, var det nødvendig med data av banen. Dette ble gitt gjennom løfteskjema som inneholder den nødvendige informasjonen. Data som ble benyttet er høydedata for vertikalgeometri og horisontalgeometri med kurveradie og overhøyde.

A.2.2 Hastigheter

I simuleringen ville det ikke være realistisk å kjøre med samme hastighet hele tiden, uavhengig av banegeometri. Dette ble løst ved å benytte Jernbaneverkets tekniske regelverk for å sette opp en hastighetsprofil på banen [108]. For å forenkle simuleringen, ble en fast topphastighet på 130 km/t valgt med begrensninger i sving avhengig av kurve og overhøyde. I følge Handbook of Railway Vehicle Dynamics [109] finnes det flere standarder for maksimal akselerasjon og nedbremsing for passasjerkomfort. Vi valgte å benytte en enkel modell med 0,3g som grense hvis effekttilførsel var stor nok.

A.2.3 Krefter ved togfremføring

For å modellere togfremføring, ble en modell som tar hensyn til skinnefriksjon, kurvefriksjon, høyde og luftmotstand valgt. Skinnefriksjon kommer av hjulets bevegelse mot skinnen. Kurvefriksjon er hovedsakelig som følge av rotasjonen av bogie på skinnene. Høyde er overvinnelse av tyngdekraften. Luftmotstand er friksjon mot luften rundt toget. Alle disse nevnte kreftene vil være avhengig av togtype og skinnetilstand. For å skape en nøyaktig modell må man gjøre målinger på et togsett, for så å finne en matematisk modell til å beskrive dataene. Det ble valgt en forenklet modell først brukt allerede på 30-tallet beskrevet i Handbook of Railway Vehicle Dynamics. Denne modellen antar en skinnefriksjon bestående av et konstantledd og et ledd som er lineært avhengig av hastighet. Kurvefriksjon antas lineært avhengig av krumningsradie. Høyde benytter gravitasjon og potensiell energi. Luftmotstand antar en direkte sammenheng med kvadratet av hastigheten.

A.2.4 Togmodell

Handbook of Railway Vehicle Dynamics beskriver noen modeller for enkelte togtyper funnet ved hjelp av eksperimentene. Vi valgte å benytte disse sammen med en kompensering av vekt for vår simulering.

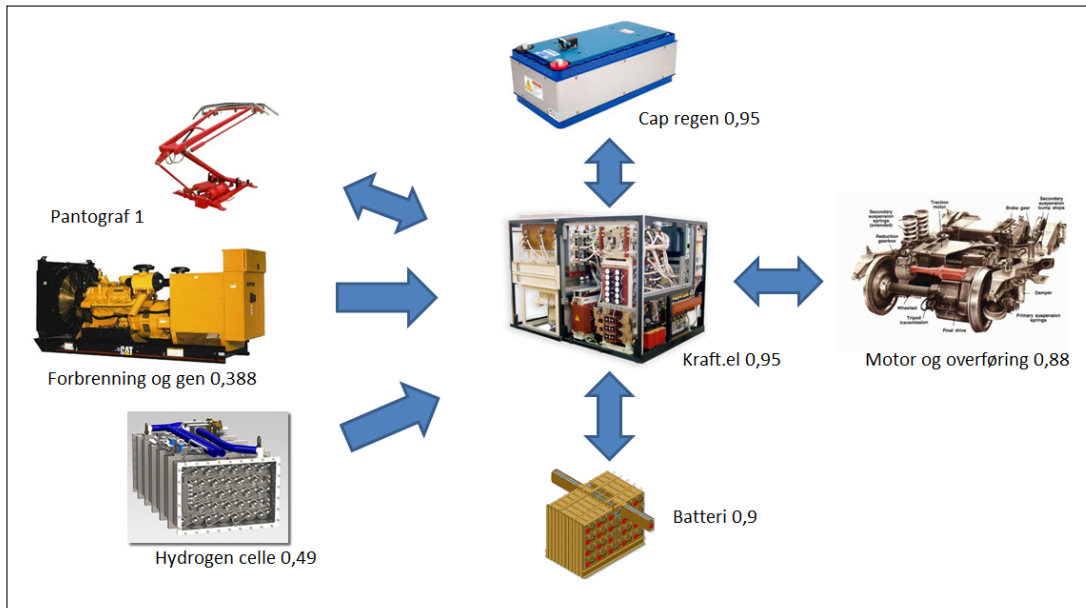
$$\text{Skinnefriksjon: } F_s = 6 * \text{vekt}[\text{tonn}] + 0.0054 * \text{vekt}[\text{tonn}] * \text{fart}[\text{km/t}]$$

$$\text{Kurvefriksjon: } F_r = 6116 * \text{vekt}[\text{tonn}] * \text{Kurveradie} [\text{m}]$$

$$\text{Høyde: } F_h = \text{vekt}[\text{tonn}] * 1000 * 9,81 * \sin(\text{stigningsvinkel})$$

$$\text{Luftmotstand: } F_l = 0.0013 * \text{vekt}[\text{tonn}] * \text{fart}[\text{km/t}]$$

For å beregne tilført energi til toget, må man ta hensyn til virkningsgrader i hvert ledd i toget. Basert på flere kilder ble virkningsgradene som vist i figur A.1 benyttet [110], [111]. Virkningsgrad på 1 i pantograf inneholder ikke overføringer i kraftnettet. Disse er beregnet separat.



Figur A.1: Illustrasjon av virkningsgrader benyttet i simulering

Vedlegg B

Beregninger

B.1 Beregning av energibruk for godstog på KL

$$0.72 * 10^6 [l] * 10.1 [kWh/l] = 7.3GWh$$

$$7.3 * \frac{0,4 [\text{virkningsgrad diesel}]}{0,836 [\text{virkningsgrad elektrisk}]} * 0.8 [\text{regenerering godstog}] = \underline{\underline{2,78GWh}}$$

$$\text{Energibruk persontog KL} = \underline{\underline{2.5GWh}}$$

B.2 Beregning av energitap på Rørosbanen

$$\text{Total energibruk} = 5,3GWh$$

$$\text{Energitap} = 12\%$$

$$\text{Energitap} = 0,12 * 5,3[GWh] = 0,64GWh$$

B.3 Beregning av forsinkelser på Rørosbanen

$$1473,5[t] * \frac{5,3[\text{trafikk Røros(energi)}]}{500[\text{trafikk land(energi)}]} = 15[t]$$

B.4 Beregninger utslipp for produsert batteri

I rapporten er det beregnet at det blir sluppet ut 87-95 g CO₂eq per kjørte kilometer for en gjennomsnittlig elbil grunnet produksjon av hele bilen. I denne beregningen er det anslått at en elbil kjører 150 000 km i løpet av sin levetid, altså det vil være et utslipp

på 13,5 tonn for å produsere hele bilen. 35-41% av utslippene skyldes produksjon av batteri, og kraftelektronikk. Resten av utslippet går til karroseri og andre komponenter til bilen som også diesel/bensinbiler må ha. En en gjennomsnittlig elbils batteristørrelse på 70kWh gir da utslipp til batteriproduksjon i området 65-84 kg-CO₂/kWh produsert batteri.

Vedlegg C

Kostnader - Elektrifisering Trønderbanen og Meråkerbanen

Elektrifisering Trønderbanen og Meråkerbanen	Kostnadselement	Enhet	Mengde			RS/Enhetspris (NOK)			Sanns.	Forventet	Simulert avvik (MNOK)		
			P10	Sanns.	P90	P10	Sanns.	P90			P10	Forv.	P90
BRUER													
Jernbanebruer													
	Store overgangsbruer Trondheim - Steinkjer (jekkingsenke spor, ny bru) inkl. veier	stk	3	12	15	5 000 000	8 000 000	15 000 000	96,0	91,4	-72,5	-4,6	75,3
	Små overgangsbruer Trondheim - Steinkjer (jekkingsenke spor, ny bru) inkl. veier	stk	11	17	21	1 500 000	3 000 000	5 000 000	51,0				
	Store overgangsbruer Hell - Storlien inkl. veier	stk	1	2	4	3 000 000	5 000 000	8 000 000	10,0	13,3	-5,6	3,3	13,9
	Små overgangsbruer Hell - Storlien inkl. veier	stk	9	15	20	1 500 000	3 000 000	5 000 000	45,0				
	Jernbanebruer Trondheim - Steinkjer	stk		9			0		0,0	0,0			
	Jernbanebruer Hell - Storlien	stk		2			0		0,0	0,0			
	Sum jernbanebruer								202,0	203,7	-89,7	1,7	100,7
BYGNINGSMESSIGE ARBEIDER													
Relehus, bygninger													
	Elektronisk hus utvidelser, Trondheim - Steinkjer	stk	6	10	17	900 000	1 000 000	1 100 000	10,0	11,3	-4,1	1,3	7,0
	Elektronisk hus, Hell - Storlien komplette med installasjon	stk		2		1 800 000	2 000 000	2 200 000	4,0	4,0	-0,4	0,0	0,4
	AT-transformatorer, bygninger, Trondheim - Steinkjer	stk		14		450 000	500 000	550 000	7,0	7,0	-0,7	-0,0	0,7
	AT-transformatorer, bygninger, Hell - Storlien	stk		8		450 000	500 000	550 000	4,0	4,0	-0,4	-0,0	0,4
	Sum Relehus, bygninger								25,0	26,2	-4,2	1,2	7,2
ELEKTRO													
Banestørforsyning													
	Omløperstasjoner (Komplett med bygning)	stk		2		150 000 000	200 000 000	300 000 000	400,0	442,6	-102,0	42,6	199,6
	Sum banestørforsyning								400,0	442,6	-102,0	42,6	199,6
KL-anlegg													
	AT Kontaktledningsanlegg system 20 eks. fundament, Trondheim - Steinkjer	m	135 000	150 000	165 000	2 200	3 000	3 800	450,0	450,7	-123,4	0,7	126,6
	AT Kontaktledningsanlegg system 20 eks. fundament, Hell - Storlien	m	67 500	75 000	82 500	2 200	3 000	3 800	225,0	225,3	-62,4	0,3	64,3
	Fundamenter kl. Trondheim - Steinkjer, <i>pr. stk.</i>	stk	3 000	3 200	4 000	20 000	40 000	70 000	128,0	153,5	-59,6	25,5	114,5
	Fundamenter kl. Hell - Storlien, <i>pr. stk.</i>	stk	1 400	1 500	1 800	20 000	40 000	70 000	60,0	70,4	-29,1	10,4	51,4
	Fjernstyring, inkl. sluttkontroll, <i>total</i>	RS		1		8 000 000	10 000 000	12 000 000	10,0	10,0	-2,0	-0,0	2,0
	Sum KL-anlegg								873,0	909,8	-179,6	36,8	259,0

Tabell I-3 Grunnlagsdata totalt; Bruer, bygningsmessig arbeider og elektro

pr. meter
pr. meter

Elektrifisering Trønderbanen og Meråkerbanen												
Kostnadselement	Enhet	Mengde			RS/Enhetspris (NOK)			Simulert avvik (MNOK)				
		P10	Sanns.	P90	P10	(Sanns.)	P90	Sanns.	Forventet	P10	Forv.	P90
Jording (langsgående jordleder) på stasjoner Trondheim - Steinkjer	m	18 000	20 000	22 000	270	300	330	6,0	6,0	-0,8	-0,0	0,8
Jording (langsgående jordleder) på stasjoner Hell - Storfien	m	2 700	3 000	3 300	270	300	330	0,9	0,9	-0,1	0,0	0,1
Jording fri linje, Trondheim - Steinkjer	pkt	800	1 000	1 200	4 500	5 000	5 500	5,0	5,0	-1,1	0,0	1,1
Jording fri linje, Hell - Storfien	pkt	400	500	600	4 500	5 000	5 500	2,5	2,5	-0,5	-0,0	0,5
Sum jording								14,4	14,4	-1,5	0,0	1,6
SIGNALANLEGG												
Fjernstyringsanlegg (endringer i skjembildet)	RS		0									
Fjernstyring Hell-Storfien	stk		1		1 000 000	3 000 000	5 000 000	3,0	3,0	-2,0	-0,0	2,0
F-ATC Hell - Storfien	stk		2		4 000 000	5 000 000	6 000 000	10,0	10,0	-2,0	0,0	2,0
Sikringsanlegg Hell-Storfien (SignAn)	stk		2		20 000 000	20 000 000	25 000 000	40,0	44,4	0,0	4,4	9,9
Automatisk togkontroll F-ATC, Trondheim - Steinkjer	stk		17		4 000 000	5 000 000	6 000 000	85,0	85,0	-17,0	0,0	16,9
Akseltellersystem (komplett inkl. kabling) Trondheim - Steinkjer	stk		17		2 000 000	3 000 000	3 500 000	51,0	47,4	-17,0	-3,6	8,7
Akseltellersystem (komplett inkl. kabling) Hell - Storfien	stk		2		2 000 000	3 000 000	3 500 000	6,0	5,6	-2,0	-0,4	1,0
Testing og idriftsettelse	pr.stasjon		19		400 000	500 000	600 000	9,5	9,5	-1,9	-0,0	1,9
Sum Signal								204,5	204,9	-23,5	0,4	24,3
TELE												
Fiberkabel G24, Trondheim - Steinkjer (legges i faseleder)	m	135 000	150 000	165 000	80	100	400	15,0	33,4	-3,0	18,4	45,2
Fiberkabel G24, Hell - Storfien (legges i faseleder)	m	67 500	75 000	82 500	80	100	400	7,5	16,7	-1,4	9,2	22,4
Sum Tele/data								22,5	50,1	-4,2	27,6	67,3
Vedlikeholdsbase	stk		1,0		10 000 000	30 000 000	50 000 000	30,0	29,9	-20,1	-0,1	19,9
SUM Entrepreniskostnader								1 875,6	2004,7	-150,3	129,1	413,4
SUM 1-6								2 547,2	2683,7	-171,0	136,5	443,9
Uspesifisert												
Uspesifisert	%	5,0 %	10,0 %	15,0 %				61,4	64,6	-30,6	3,2	38,1
SUM Uspesifisert								61,4	64,6	-30,6	3,2	38,1
Kostnadsestimat ekskl. indre/ytre faktorer								2 608,6	2748,4	-175,2	139,7	453,1

2: pr. S.H.K.
2: pr. S.H.K.

Tabell I-4 Grunnlagsdata Totalt; Elektro (jording), signalanlegg, tele, vedlikeholdsbase og uspesifisert

Vedlegg D

TIOS

29.12.2014	723 Vestfossen	Nei	00:06	107166 Kongsberg - Nordagutu. Tss Drammen/Borge Meheia: Det vises seg at KL feilen var mer omfattende enn først antatt. Muligens ferdi kl. 13:00. Det kjøres buss for tog på strekningen	
29.12.2014	723 Gulskogen	Nei	00:04	107166 Kongsberg - Nordagutu. Tss Drammen/Borge Meheia: Det vises seg at KL feilen var mer omfattende enn først antatt. Muligens ferdi kl. 13:00. Det kjøres buss for tog på strekningen	
29.12.2014	723 Sandvika	Nei	00:04		Tomtog fra Hok
29.12.2014	723 Oslo S	Nei	00:28	107166 Kongsberg - Nordagutu. Tss Drammen/Borge Meheia: Det vises seg at KL feilen var mer omfattende enn først antatt. Muligens ferdi kl. 13:00. Det kjøres buss for tog på strekningen	Tomtog fra Hok
29.12.2014	729 Øysteinstul	Nei	00:04	107166 må sjekkes. Fortsatt stengt Meheia - Øysteinstul. Mulig ny feil	+ kryssinger
29.12.2014	729 Vestfossen	Nei	00:08	107166 må sjekkes.	+ kryssinger
29.12.2014	733 Oslo S	Nei	00:04		Fra 712
Sum Elkraft/Kontaktledningsan: 5071			7	1473:27:00	
Sum HL	Elkraft/Kontaktledningsanlegg	Uten	1286	Sum enkle	38 Antall grupper
Sum Infrastrukturforvalter: 5071			7	1473:27:00	
Sum alle årsaker: 5071			7	1473:27:00	
Sum HL	alle årsaker	Uten	1286	Sum enkle	38 Antall grupper
					160 Sum i gruppe

Vedlegg E

Vedlikehold

Prosjektoversikt									
Koststed 32170 Elkraft Trønderbanen									
(Beskrivelse)	(Akt.nr)	(Beskrivelse)	Budsjett	Mengde	Mannskapskost	Maskinkost	Materiellkost	Entreprisekost	Sum
32170 prosjekt KL Trønderbanen 2015									
		892103 Banenr. 1120 Støren - Trondheim	3 623 000,0		-	-	-	-	-
	420010	Åkutt feilretting KL	240 000,0		126 300,0	80 000,0	33 700,0	-	240 000,0
	420020	Utsatt feilretting KL	500 000,0		210 500,0	100 000,0	189 500,0	-	500 000,0
	520000	Kontroll KL, ihht generiske arbeidsrutiner	1 200 000,0		799 900,0	380 000,0	20 100,0	-	1 200 000,0
	520010	Stikkbytte KL master inkl fundament	-		-	-	-	-	-
	520020	Utskifting KL brytere, til lastskillebryter	225 000,0		92 620,0	37 500,0	94 880,0	-	225 000,0
	520900	Øvrig forebyggende vedlikehold KL, komponentbytte	590 750,0		210 500,0	100 000,0	280 250,0	-	590 750,0
	520900	Øvrig timer KL	446 250,0		445 418,0	-	832,0	-	446 250,0
	420000	Planmessig beredskap KL	421 000,0		421 000,0	-	-	-	421 000,0
		892103 Banenr. 1200 (Trondheim) - Hell	-		-	-	-	-	-
		892103 Banenr. 1210 (Hell) - Storlien	-		-	-	-	-	-
		892103 Banenr. 1300 (Hell) - Steinkjer	-		-	-	-	-	-
	620040	896353 Mindre formyelse Banenr 1120 Støren - Trondheim	2 023 000,0		-	-	-	-	-
	620040	Sugetrafoer	1 631 600,0		556 720,0	160 000,0	914 880,0	-	1 631 600,0
	620040	Impedanser	223 000,0		100 770,0	-	122 230,0	-	223 000,0
	620040	Tegningsretting, tverrfaglig jordingsplan	168 400,0		168 400,0	-	-	-	168 400,0
	620000	896353 MFO ekstra midler banenr 1120	842 000,0		-	-	-	-	-
	620000	Forbigangsledning Marienborg	500 000,0		362 060,0	131 250,0	6 690,0	-	500 000,0
	620000	Bytte 7 stk. seksjonsisolatorer Trondheim	342 000,0		132 615,0	65 625,0	143 760,0	-	342 000,0
Sum	32170 prosjekt KL Trønderbanen 2015				3 626 803,0	1 054 375,0	1 806 822,0		6 488 000,0