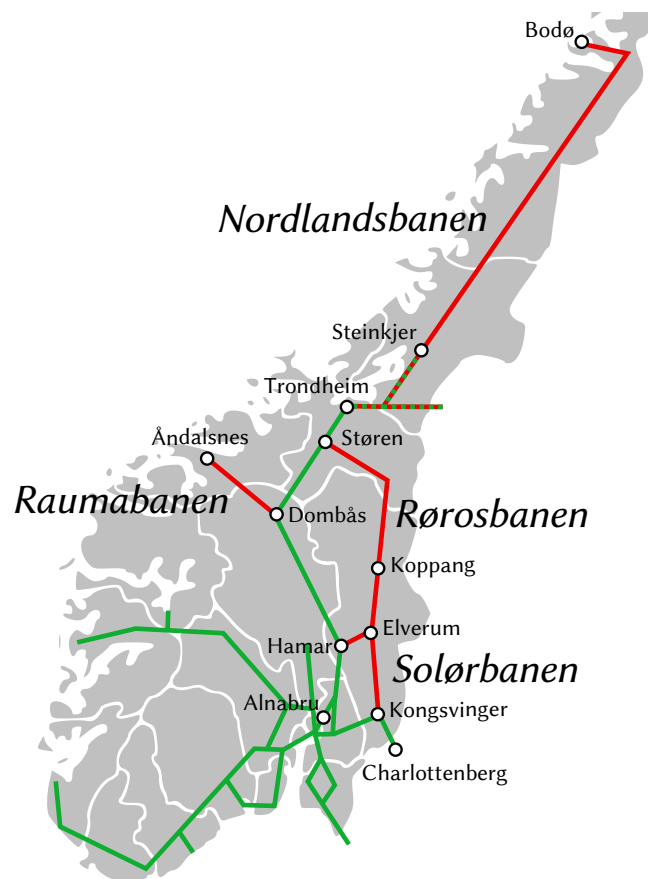


Rapport

Analyse av alternative driftsformer for ikke-elektrifiserte baner

Forfatter(e)

Steffen Møller-Holst, Federico Zenith, Magnus Thomassen



SINTEF MK og SINTEF IKT

Postadresse:
Postboks 4760 Sluppen
7465 Trondheim
Sentralbord: 73593000
Telefaks: 73594399

postmottak.IKT@sintef.no
www.sintef.no
Foretaksregister:
NO 948 007 029 MVA

EMNEORD:

Ikke-elektrifiserte baner
Tog
Godstog
Hydrogen
Batteri
Diesel
Biodiesel
Naturgass
Nordlandsbanen
Rørosbanen
Solørbanen
Raumabanen
Energi
Kostnader
Alternative drivstoff
Drivstoff

Rapport

Analyse av alternative driftsformer for ikke-elektrifiserte baner

VERSJON

2.2

DATO

24. juli 2015

FORFATTER(E)

Steffen Møller-Holst, Federico Zenith, Magnus Thomassen

OPPDRAGSGIVER(E)

Jernbaneverket

OPPDRAGSGIVERS REFERANSE

Lise Nyvold

PROSJEKT

102007594

ANTALL SIDER INKL. VEDLEGG

111

SAMMENDRAG

Alternative drivstoff og framdriftsteknologier er evaluert for ikke-elektrifiserte banestrekninger i Norge. Gjennom en kvalitativ ståstedsanalyse (fase I, høsten 2014) ble fire mulige alternative konsepter (batteri, hydrogen, naturgass og biodiesel) evaluert med diesel-elektrisk framdrift og konvensjonell elektrifisering som referansekonsepter. Åtte sentrale parametere for jernbanedrift lå til grunn for sammenlikning av konseptene. Ekspertene fra Jernbaneverket så vel som SINTEF ble gjennom 2 workshops involvert og har bidratt til at resultatene er konsistente og konklusjonene robuste. Resultatene viste at flere konsepter kan bli aktuelle for implementering, og SINTEF konkluderte med at det ikke er hensiktsmessig å gjennomføre konvensjonell elektrifisering for resterende ikke-elektrifiserte jernbanestrekninger før alternativene til nullutslipp er utredet mer i detalj.

Arbeidet ble videreført i en todelt fase II våren 2015. I del a) ble forventninger til teknologi- og kostnadsutvikling, samt innskjerping av miljøkrav og tilgjengelighet av teknologi og regelverk evaluert for utvalgte konsepter. Fem nøkkelfaktorer ble lagt til grunn for evaluering av konseptenes aktualitet for implementering i det norske jernbanenettet i 2021, 2027 og 2050. I del b) av Fase II er tekniske muligheter og estimer for del-elektrifisering (kombinasjon av kontaktledning/batteri/hydrogen) evaluert.

Resultatene fra prosjektet viser at flere alternative fremdriftskonsepter vil kunne bli aktuelle for implementering og gi nullutslipp for ikke-elektrifiserte jernbanestrekninger i Norge allerede i 2021.

UTARBEIDET AV

Federico Zenith og Steffen Møller-Holst

SIGNATUR**KONTROLLERT AV**

Anders Ødegård

SIGNATUR**GODKJENT AV**

Ingeborg Kaus

SIGNATUR**RAPPORTNUMMER**

SINTEF F27096

GRADERING

Fortrolig

GRADERING DENNE SIDE

Fortrolig

Innhold

I Grovanalyse	5
Sammendrag	5
I.1 Bakgrunn, fokus og målsetting for prosjektet	6
I.1.1 Bakgrunn	6
I.1.2 Dagens jernbanenett	7
I.1.3 Fokus og målsetting for grovanalysen	7
I.2 Tilnærming til problemstillingen, prosess og metode	9
I.2.1 Tilnærming og rammeverk	9
I.2.2 Valg av evalueringsparametere og vektlegging	9
I.2.3 Valg av konsepter og forutsetninger for Grovanalysen	10
I.2.4 Nordlandsbanen som Case for å belyse kritiske faktorer for lange strekninger	12
I.3 Evalueringsparametere og vektlegging av underparametere	14
I.3.1 Energieffektivitet	14
I.3.2 Fleksibilitet/Robusthet	15
I.3.3 Gjennomførbarhet	15
I.3.4 Miljøkonsekvenser	16
I.3.5 Pålitelighet	17
I.3.6 Ressurstilgang	17
I.3.7 Sikkerhet	18
I.3.8 Totalkostnad	18
I.4 Konsepter for grovanalyse, kort beskrivelse av virkemåte	19
I.4.1 Konvensjonell elektrisk framdrift (med KL-anlegg, referanse)	19
I.4.2 Diesel-elektrisk tog (referanse)	19
I.4.3 Batteri-elektriske tog	20
I.4.4 Hydrogen	22
I.4.5 Naturgass	23
I.4.6 Biodiesel	24
I.5 Resultater og diskusjon	25
I.5.1 Energieffektivitet	26
I.5.2 Fleksibilitet/Robusthet	26
I.5.3 Gjennomførbarhet	27
I.5.4 Miljøkonsekvenser	28
I.5.5 Pålitelighet	29
I.5.6 Ressurstilgang	29
I.5.7 Sikkerhet	31
I.5.8 Totalkostnad	32
I.6 Oppsummering, konklusjoner og anbefalinger for videre arbeid i fase II	33
I.6.1 Oppsummering og sammenstilling av resultater	33
I.6.2 Anbefalinger for tolkning og bruk av resultatene	34
I.6.3 Konklusjoner	34
I.6.4 Anbefalinger for videre arbeid i fase II	34

Ila	Ulike konsepters aktualitet for implementering	35
	Sammendrag	35
Ila.1	Bakgrunn, trender og drivkrefter	36
Ila.2	Norges rolle i en internasjonal kontekst	36
Ila.3	Utfordringen og jernbanens bidrag til utslippsreduksjoner	37
Ila.3.1	Drivkrefter globalt, i Europa og nasjonalt	39
Ila.3.2	Politisk engasjement i Europa og Norge	41
Ila.3.3	Industriens engasjement og utvikling av hybride drivlinjer	45
Ila.4	Tilnærming til problemstillingen og valg av metode	46
Ila.4.1	Valg av faktorer for evaluering av aktualitet	47
Ila.4.2	Faktorenes innvirkning på ulike konsepters aktualitet	48
Ila.4.3	Kvantifisering av ulike konsepters aktualitet	49
Ila.5	Definisjon av utvalgte faktorer	50
Ila.5.1	Miljøkrav	50
Ila.5.2	Tilgjengelighet av teknologi	50
Ila.5.3	Tilgjengelighet av regelverk	51
Ila.5.4	Økonomi	51
Ila.5.5	Fleksibilitet/Robusthet	51
Ila.6	Resultater og diskusjon	52
Ila.6.1	Miljøkrav	53
Ila.6.2	Tilgjengelighet av teknologi	54
Ila.6.3	Tilgjengelighet av regelverk	55
Ila.6.4	Økonomi	56
Ila.6.5	Fleksibilitet/Robusthet	56
Ila.6.6	Sensitivitet mht. trafikk tetthet	58
Ila.7	Konklusjoner: Ulike konsepters aktualitet i 2021, 2027 og 2050	58
Ila.7.1	Aktuelle konsepter for implementering i 2021	60
Ila.7.2	Aktuelle konsepter for implementering i 2027	60
Ila.7.3	Aktuelle konsepter for implementering i 2050	61
Ila.7.4	Sammenfatning av resultater	61
Ilb	Energetiske og økonomiske beregninger	62
	Sammendrag	62
Ilb.1	Togmateriell	62
Ilb.1.1	Referansetog	62
Ilb.1.2	Lokomotiver	62
Ilb.1.3	Lokomotiv med biodiesel	64
Ilb.1.4	Lokomotiv med flytende naturgass	64
Ilb.1.5	Kontaktledning (KL)	64
Ilb.1.6	Batterier	64
Ilb.1.7	Brenselceller	65

Iib.1.8	Hydrogenlagring	65
Iib.1.9	Hybrid med hydrogen og batteri	65
Iib.1.10	Hydrogenproduksjon fra fornybare energikilder	66
Iib.2	Energianalyse	66
Iib.2.1	Interaksjon med eksisterende teknologi	67
Iib.2.2	Analysemetode	67
Iib.2.3	Nordlandsbanen	69
Iib.2.4	Rørosbanen	73
Iib.2.5	Røros- og Solørbanen	73
Iib.2.6	Raumabanen	80
Iib.2.7	Konklusjoner for energianalysene	85
Iib.3	Økonomi	86
Iib.3.1	Flytende naturgass	87
Iib.3.2	Energibehov på elektrifiserte strekninger	87
Iib.3.3	Sammenligningskriterium for forskjellige teknologier	88
Iib.3.4	Kompensering for redusert nyttelast	88
Iib.3.5	Kostnadsberegning	89
Iib.3.6	Resultater	92
Iib.4	Konklusjoner	96
	Referanser	98
	Vedlegg	101
A	Deltakere ved workshops	101
A.1	Workshop 20. juni 2014	101
A.2	Workshop 3. september 2014	101
A.3	Workshop 9. mai 2015	101
B	Underlag for beregning av kapasitet for batterier/hydrogen	102
C	Transport 2050 Roadmap	103
D	Vurdering av naturgass som alternativt drivstoff	104
E	Biogass som drivstoff	105
F	Nåverdi- og annuitetsmetoden	106
G	Forlenget godstog	107
H	Antagelser	109
H.1	Energi	109
H.2	Økokomi	109
I	Akronymer og begreper	110

Fase I

Grovanalyse

Sammendrag

I Stortingsmelding Meld. St. 26 ber regjeringen om at Jernbaneverket gjennomfører en vurdering av konsekvenser av å elektrifisere gjenstående dieseltrekninger, dvs. Røros- og Solørbanen, Nordlandsbanen, Raumabanen og Bratsbergbanen (kort strekning). Jernbaneverkets respons på anmodningen vil komme i form av Strategi for ikke-elektrifiserte baner.

Dette prosjektet, utført av SINTEF, med tittelen *Alternative drivstoff og framdriftsteknologier*, skal fungere som innspill til Jernbaneverkets Strategi for ikke-elektrifiserte baner. Denne delen dekker fase I av prosjektet, som består i å foreta en Grovanalyse av en rekke ulike framdriftskonsepter.

Det er besluttet at prosjektet skal **fokusere på godstransport** og at analysen skal bestå i en **gjennomgang av alternative konsepter** til diesel og elektrifisering som driftsform. Grovanalysen er en ståstedsanalyse (per 2014), der det fokuseres på teknologiske muligheter og begrensninger, mens økonomiske og politiske aspekter trekkes inn der dette er påkrevet.

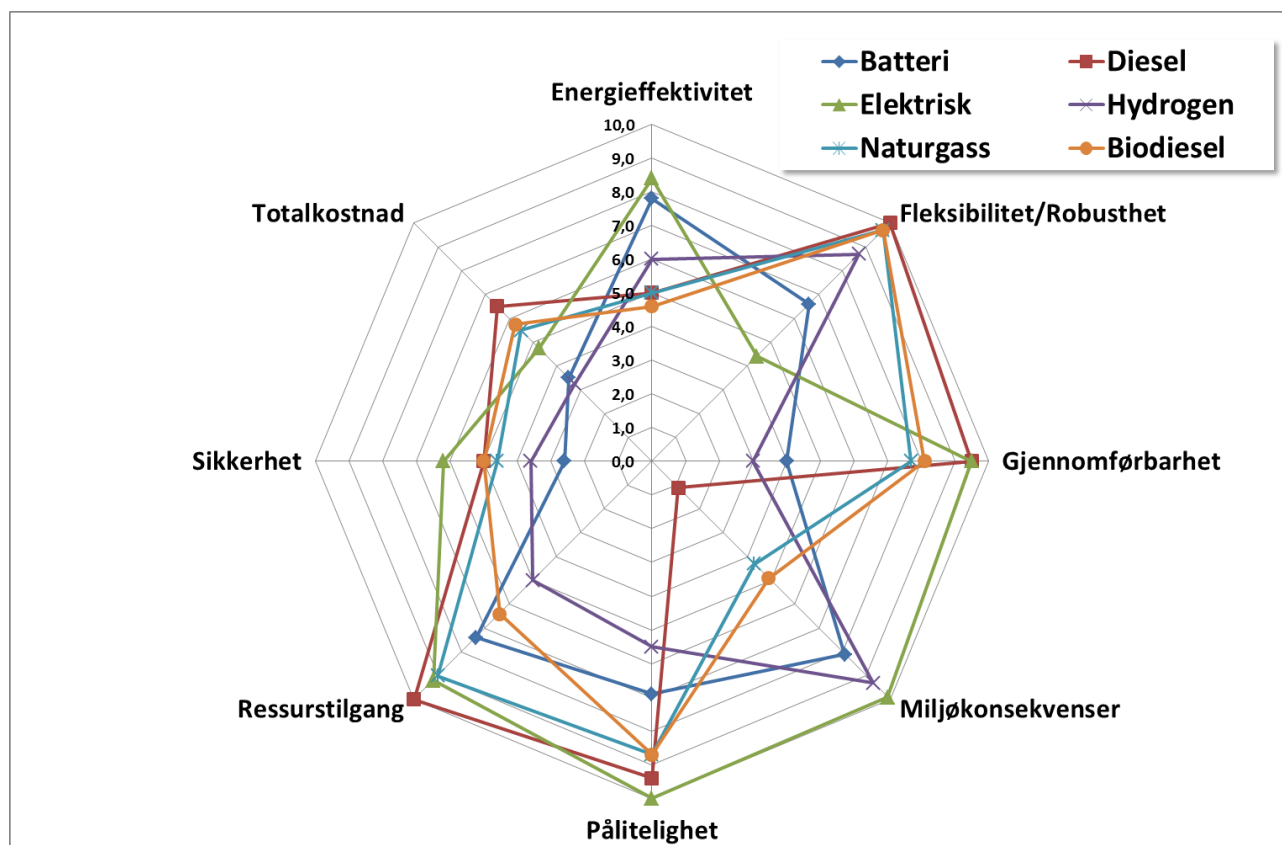
Arbeidet har bestått i at kjernegruppen har utarbeidet underlag og at en gruppe av utvalgte eksperter fra Jernbaneverket og SINTEF i løpet av to heldags workshoper har kommentert og kommet med innspill og forslag til endringer for å kvalitetssikre arbeidet. Følgende 8 parametere er evaluert i Grovanalysen:

- Energieffektivitet
- Flexibilitet/Robusthet
- Gjennomførbarhet
- Miljøkonsekvenser
- Pålitelighet
- Ressurstilgang
- Sikkerhet
- Totalkostnad

Seks ulike konsepter for framdrift av tog er vurdert i denne Grovanalysen:

- **Elektrifisering** (tog med kontaktledning, KL) slik vi kjenner dette konseptet i dag (referanse)
- **Diesel**-elektriske tog slik vi kjenner disse i dag (referanse)
- **Batteri**-elektriske tog, der disse lades ved endestasjonene
- **Hydrogen**-drevne tog (med brenselcelle for energikonvertering og gassformig lagring av H₂)
- **Naturgass**-drevne tog med forbrenningsmotor
- **Biodrivstoff**-drevne tog med forbrenningsmotor

De åtte parameterne som konseptene er vurdert opp mot, representerer alle sentrale fasetter i en totalvurdering som bør ligge til grunn for den videre satsing på jernbanen i Norge. Tilsammen 22 underparametere er blitt definert og gitt vektning (i workshops), og dette har dannet grunnlag for evaluering av de seks fremdriftskonseptene. Resultatene er sammenfattet i figur 1.



Figur 1: Sammenfatning av resultater fra grovanalysen for de 6 konseptene langs 8 akser (parametere).

Det er viktig å påpeke at den grovanalysen som er foretatt er en kvalitativ ståstedsanalyse, der de ulike konseptene er vurdert i forhold til hverandre gitt dagens teknologiske modenhet. Resultatene vil i så måte gi en pekepinn på hvilke fordeler og ulemper de ulike konseptene har, men gir ikke eksakte tall for hvor mye bedre eller verre et konsept vil være sammenliknet med et annet.

Den teknologiske utviklingen går meget raskt, spesielt innen batteriteknologi for personbiler, men også innen hybridisering av skip og tog. Massiv trykk for å fase inn naturgass i skip er også en trend vi forventer vil kunne få betydning for jernbanedrift. Tilsvarende teknologisk utvikling er på gang innen flere andre områder, derunder hydrogen og brenselceller.

Følgende hovedkonklusjon kan trekkes basert på grovanalysen som er foretatt i fase I av prosjektet:

Basert på de kvalitative vurderingene av alternative framdriftskonseppter for jernbanen, er SINTEF av den oppfatning at det ikke er hensiktsmessig å gjennomføre konvensjonell elektrifisering for resterende (ikke-elektrifiserte) jernbanestrekninger før alternativene til nullutslipp er utredet mer i detalj.

1.1 Bakgrunn, fokus og målsetting for prosjektet

1.1.1 Bakgrunn

I Stortingsmelding Meld. St. 26, Nasjonal Transportplan 2014–2023 sier regjeringen at det settes i gang elektrifisering av Trønder- og Meråkerbanen i planperioden. Overgang fra diesel til elektrisk togframføring sees som viktig både for å utvikle mer fleksible og effektive togprodukter, med mulighet for nye (gjennomgående) rutetilbud, redusert reisetid pga. raskere akselerasjon, betydning for godstransport spesielt pga. økt trekraft

og som et bidrag til å redusere miljølempene ved godstransporten generelt. NTP 2014-2023 sier samtidig at elektrifisering av resterende baner i Norge skal vurderes gjennom en utredning.

I Stortingsmelding Meld. St. 26¹ ber regjeringen om at Jernbaneverket gjennomfører en vurdering av konsekvenser av å elektrifisere gjenstående dieseltrekninger, dvs. Røros- og Solørbanen, Nordlandsbanen, Rauma-banen og Bratsbergbanen (kort strekning). Jernbaneverkets (JBVs) respons på anmodningen vil komme i form av Strategi for ikke-elektrifiserte baner.

Strategi for ikke-elektrifiserte baner utgjør en del av grunnlaget for JBVs input til Nasjonal Transportplan (NTP). Hensikten med strategien er:

- Å vurdere om en eller flere av gjenstående ikke-elektrifiserte banestrekninger bør elektrifiseres og hvilken samfunnsøkonomisk virkning, miljøgevinster mv dette har.
- Å vurdere kostnader ved eventuell elektrifisering sammen med andre nødvendige infrastrukturtiltak opp mot nytten.
- Å utrede alternativer til elektrifisering, bl.a. framføring av tog basert på biodiesel eller naturgass.

Dette prosjektet, utført av SINTEF, med tittelen *Alternative drivstoff og framdriftsteknologier*, skal dekke siste kulepunkt over og fungere som innspill til JBVs Strategi for ikke-elektrifiserte baner. Denne delen dekker fase I av prosjektet som består i å foreta en Grovanalyse av en rekke ulike framdrifts konsepter (se avsnitt I.3).

I.1.2 Dagens jernbanenett

Jernbanenettet i Norge (figur 2) består av strekninger med elektrifisert togdrift og av strekninger som kun kan benyttes av tog med ikke-elektrisk togdrift, i praksis dieseldrevne tog. Totalt er omlag 2600 km av statlige bane-nettet elektrifisert, mens dieseldrevne tog er eneste alternativ på rundt 1400 km av rutenettet. Av de gjenstående ikke-elektrifiserte bane, er det allerede besluttet å elektrifisere Trønder- og Meråkerbanen på til sammen 206 km (74 km Hell-Storlien + 125 km Trondheim-Steinkjer + 7 km Stavne - Leangen). Denne forstudien vil vurdere alternativer til diesel og elektrifisering av de resterende omlag 1200 km.

Totalt går rundt 80 % av trafikken med elektrifiserte tog i dag. I det alt vesentligste, er jernbanenettet i Norge enkeltsporet, med unntak av Gardermobanen, Drammenbanen og Askerbanen som har dobbeltspor.

I.1.3 Fokus og målsetting for grovanalysen

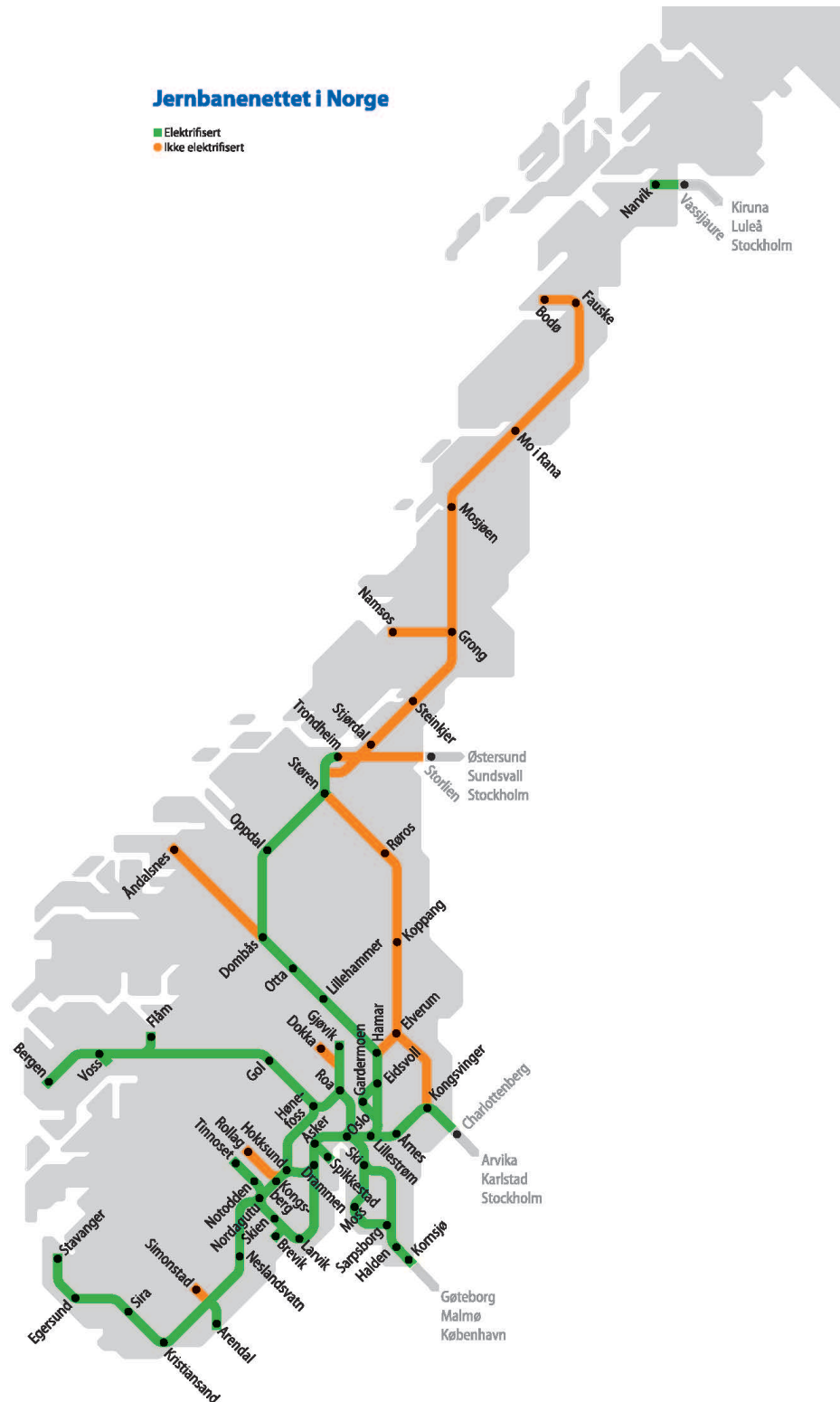
Etter innledende møter med Jernbaneverket, ble det besluttet at prosjektet skal **fokusere på godstransport**. De resterende større banene som pr i dag ikke er elektrifiserte, vil utgjøre den delen av jernbanenettet som utredningen begrenses til å omfatte. Trønder- og Meråkerbanen som ble besluttet elektrifisert i 2013, vil ikke være aktuelle for innfasing av andre alternative drivstoff eller fremdriftsteknologier.

Grovanalysen skal bestå i en **gjennomgang av alternative konsepter** til diesel og elektrifisering som driftsform, som beskrevet i avsnitt I.4. Disse alternativene skal vurderes opp imot diesel og konvensjonell elektrifisering (med kontaktledning, KL) etter utvalgte parametere som listet i avsnitt I.2.2 og nærmere beskrevet i avsnitt I.3. Det primære mål med grovanalysen er å foreta en kvalitativ **rangering av utvalgte konsepter** iht. parametere som oppdragsgiver og utreder (SINTEF) identifiserer og enes om. Grovanalysen skal så munne ut i en anbefaling av et knippe konsepter som analyseres mer i detalj i faser IIa og IIb av prosjektet.

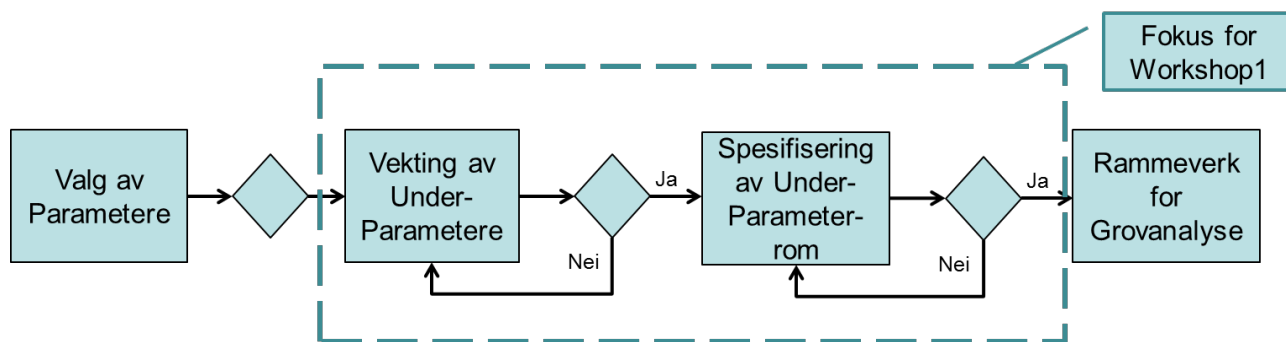
Grovanalysen er en ståstedsanalyse (per 2014), der det fokuseres på teknologiske muligheter og begrensninger, mens økonomiske og politiske aspekter kun stedvis trekkes inn der dette er påkrevet.

Gjennom gjeldende NTP har Jernbaneverket fått et oppdrag som går ut på å vurdere konsekvensene av å elektrifisere gjenstående ikke-elektrifiserte banestrekninger, jfr avsnitt I.1.1 Bakgrunn. SINTEF sitt arbeid vil gi et grunnlag for å vurdere alternative energibærere for framdrift av tog. Grovanalysen (fase I) med påfølgende fordypning i de framdriftsformene som utpeker seg som aktuelle alternativ i fase II vil gi viktig grunnkunnskap for Jernbaneverkets videre vurderinger av konseptvalg for disse banestrekningene.

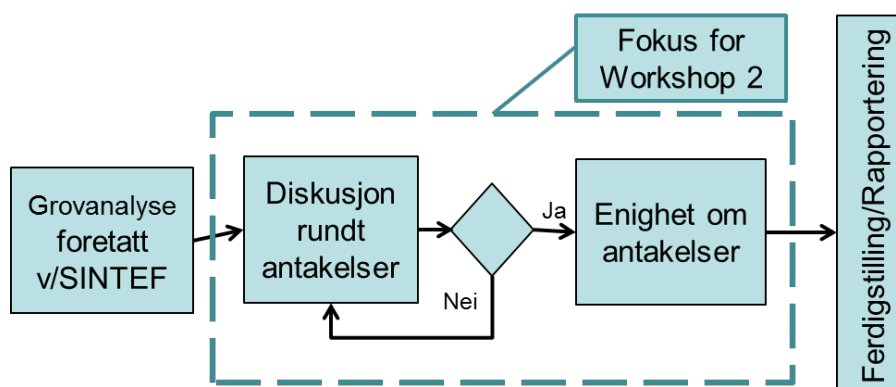
¹Bestillingen er nevnt på sidene 64, 184, 215 og 305/306.



Figur 2: Dagens jernbanenett i Norge [1].



Figur 3: Prosessen i første workshop for etablering av rammeverk for Grovanalysen.



Figur 4: Prosessen i Workshop 2, der eksperter fra JBV og SINTEF satt sammen og kom til enighet om forutsetninger og antakelser.

1.2 Tilnærming til problemstillingen, prosess og metode

1.2.1 Tilnærming og rammeverk

Det er tatt en helhetlig tilnærming i denne Grovanalysen, for å sikre at de viktigste aspektene er ivaretatt. Arbeidet har bestått i at kjernegruppen² har utarbeidet underlag og at en gruppe av utvalgte eksperter³ fra Jernbaneverket og SINTEF i løpet av to heldagsworkshoper har kommentert og kommet med innspill og forslag til endringer for å kvalitetssikre arbeidet.

Initielt ble et sett evalueringsparametere (se avsnitt I.2.2) valgt ut av representanter for oppdragsgiver i samråd med prosjekt-ansvarlige i SINTEF, heretter kalt kjernegruppen (figur 3). Hver parameter ble spesifisert og definert nærmere i form av 2-3 underparametere (se avsnitt I.2.2). Underparameternes relevans, vektlegging av disse og spesifisering av parameterrom var fokus for første workshop (juni 2014) med deltakelse av eksperter. På denne måten ble et nøytralt rammeverk for Grovanalysen av ulike konsepter (avsnitt I.2.3) etablert.

SINTEF gjennomførte så Grovanalysen der hver av de alternative konseptene ble gitt poeng fra 1–10 i henhold til det parameterrom som ble avstemt i Workshop 1. Workshop 2 ble benyttet til å diskutere og justere de antakelser og forutsetninger som ble lagt til grunn for poeng-givingen i Grovanalysen (figur 4).

1.2.2 Valg av evalueringsparametere og vektlegging

Allerede i fasen før prosjektet ble igangsatt, ga oppdragsgiver en liste over parametere som burde inngå i utredningsarbeidet. I samråd med SINTEFs prosjektansvarlige ble listen komplettert. Evalueringsparametere er

²Kjernegruppen for prosjektet har bestått av Heidi Meyer Midtun, Tor Nicolaisen, Ragnhild Wahl (alle Jernbaneverket) og Magnus Thomassen og Steffen Møller-Holst (begge fra SINTEF).

³Kompetansebase (deltakere og tilhørighet) er oppsummert i vedlegg A.

Tabell 1: Parametere, underparametere samt vekting av disse basert på konsensus i Workshop 1 (se figur 3).

*Vekting av første underparameter for Gjennomførbarhet er satt til null som nærmere beskrevet i avsnitt I.3.3.3.

Parameter	Underparametere	Vekting (%)
Energieffektivitet	Effektivitet av drivstoffproduksjon	40
	Effektivitet i fremdrift	60
Fleksibilitet/Robusthet	Mulighet for gjennomgående rutetilbud	70
	Redundans i rutenettet	30
Gjennomførbarhet	Mulighet for utarbeidelse av konkurranse-nøytrale ordninger*	0
	Nødvendig regelverk tilgjengelig	30
	Tilgjengelighet av teknologi	50
	Tilstedeværelse av aktører	20
Miljøkonsekvenser	Globalt utslipp	60
	Lokale utslipp	30
	Skadevirkning av drivstoffutslipp	10
Pålitelighet	Driftssikkerhet av togmateriell	70
	Punktlighet	30
Ressurstilgang	Forsyningssikkerhet	40
	Logistikk	20
	Tilgjengelighet av drivstoff	40
Sikkerhet	Risiko knyttet til anvendelse av drivstoff og vedlikehold av materiell & infrastruktur	40
	Risiko under drift av toget	60
Totalkostnad	Investeringskostnader for infrastruktur	25
	Investeringskostnader for rullende materiell	25
	Driftskostnader for infrastruktur	25
	Driftskostnader for rullende materiell	25

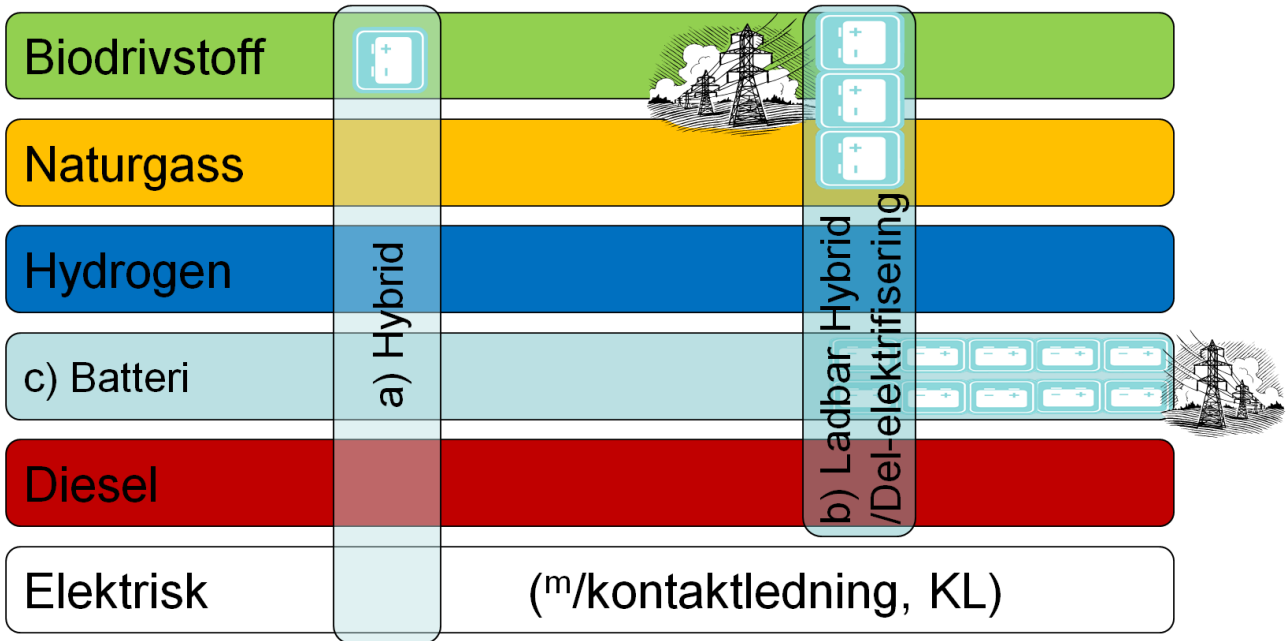
altså valgt ut i samråd med oppdragsgiver. Underparametere og vekting mellom disse ble avstemt i Workshop 1 (figur 3) og er oppsummert i tabell 1.

Det er viktig å påpeke at de valgte evalueringsparametere ikke er uavhengige, og at vi i Grovanalysen heller ikke har hatt det som ambisjon at de skal være det. Det er bevisst valgt å akseptere parameterens innbyrdes avhengighet og forholde seg til dette på en måte som ivaretar de aspekter som har betydning for aktørenes prioriteringer. Vi har i prosjektets løp til stadighet sett og diskutert hvordan en underparameter har relevans for flere evalueringsparametere, og at parameterens betydning vil variere vesentlig avhengig av hvilken aktør man fokuserer på. For å kunne foreta en Grovanalyse, er det valgt å la denne avhengigheten være der og omtale den der det kan være rom for uklarheter eller misforståelser.

I.2.3 Valg av konsepter og forutsetninger for Grovanalysen

Som et ledd i forberedelsen til første workshop (20. juli 2014) ble følgende skisse (se figur 5) over mulige konsepter utarbeidet. Konvensjonell elektrisk framdrift (med KL-anlegg) og Diesel representerer referanser for de alternative konsepter som inngår i denne utredningen. Tre alternative drivstoff er inkludert, Biodrivstoff, Naturgass og Hydrogen. I tillegg er batteri-løsninger på tre nivåer nevnt:

- a) *Hybridisering i konvensjonell forstand, slik vi kjenner teknologien fra hybridbiler (f.eks. Toyota Prius), der man benytter en mindre batteripakke for å ivareta energien under oppbremsing for så å benytte denne*



Figur 5: Skisse over mulige drivstoff og fremdriftskonsepter.

energien til å øke motorkraften under påfølgende akselerasjon.

- b) **Ladbar Hybrid** er en løsning der batterikapasiteten er større enn for løsning a) over, og batteriene kan lades fra elektrisitetsnettet (eller via strømavtaker/pantograf). Dette gjør det mulig at toget kan kjøre deler av banestrekningen elektrisk, mens den så kjører videre på respektive alternative drivstoff når batteriet er tomt (Del-elektrifisering).
- c) **Batteri-tog** har store batterisystemer som muliggjør at hele banestrekningen kan tilbakelegges elektrisk basert på den elektriske energien som er lagret i batteriene.

Grovanalysen er en første sondering av ulike konsepters egnethet for framdrift av tog i Norge. Den er en nåtidsanalyse, men skal også angi trender og indikere hvilke konsepter som forventes å kunne bli kommersielt tilgjengelige innen 2021, 2027 og 2050. For å muliggjøre evaluering for 8 utvalgte parametere og derunder tilsammen 22 underparametere, ble seks konsepter valgt ut for grovanalysen:

- **Elektrisk** tog med kontaktledning (KL) slik vi kjenner dette konseptet i dag (referanse)
- **Diesel**-elektriske tog slik vi kjenner disse i dag (referanse)
- **Batteri**-elektriske tog (der batteriene lades ved endestasjonene)
- **Hydrogen**-drevne tog (med brenselcelle for energikonvertering og gassformig lagring av H₂)
- **Naturgass**-drevne tog med forbrenningsmotor
- **Biodrivstoff**-drevne tog med forbrenningsmotor

Følgende forutsetninger er gjort for grovanalysen:

- **Grovanalysen er en Nåtidsbilde/analyse (2014)**. Det vil si at alle konseptene vurderes iht. parameterne med utgangspunkt i dagens situasjon, både mht. teknologienes modenhet, ytelse, leverandører og markedsaktører. Det vil i den påfølgende, mer detaljerte analysen av utvalgte konsepter (i fase II av prosjektet), foretas evaluering som ivaretar en tidsmessig differensiering av konseptene i form av forventet teknologiutvikling innen 2021, 2027 og 2050.

- **Elektrisitet som kilde til framdrift av tog baseres på fornybare energikilder** og forutsettes dermed å være utslippsfri. Dette omfatter elektriske tog (m/KL), samt batteri- og hydrogentog.
- Biodrivstoff finnes i en rekke ulike former (bioetanol, biodiesel, biogass etc.). I dette prosjektet er det **valgt å se på biodiesel**, da dette drivstoffet har mange likhetstrekk med konvensjonell diesel, og dermed kan omsettes i eksisterende **forbrenningsmotorer** som benyttet i tog i dag uten store endringer/tilpasninger. Biodieselen forutsettes **fremstilt ved 2. generasjonsteknologi** der hele planteråstoffet utnyttes (trevirke, så som flis, tømmer).
- **Naturgass omsettes i forbrenningsmotor**, da høytemperatur brenselceller (som kan konvertere naturgass direkte til elektrisitet) ikke har egnede egenskaper for anvendelser innen transport. **Naturgass distribueres og lagres i toget i flytende form (LNG)**.
- **Hydrogen omsettes i brenselceller**, da disse er mer effektive enn forbrenningsmotorer. Brenselceller av PEM-typen er best egnet for transportapplikasjoner⁴ og er tilgjengelige i enheter på 200 kW for bussapplikasjoner. **Hydrogen distribueres i gassform**, da energitapet knyttet til å gjøre drivstoffet flytende pr dags dato er høyt.
- **Batteri-tog benytter Li-basert batteriteknologi(er)**. Helelektriske batteritog (som kun lades ved endestasjonene) evalueres i grovanalysen, mens resultatene fra grovanalysen vil peke i retning av om ladbare hybrid-tog eller kombinasjon med del-elektrifisering kan være relevant for etterfølgende aktivitet i fase II.

1.2.4 Nordlandsbanen som Case for å belyse kritiske faktorer for lange strekninger

For å få et bedre bilde av hvilke teknologier som kan egne seg som alternativer til elektrifisering, er Nordlandsbanen valgt ut som case. Strekningen Trondheim–Bodø er 734 km lang og er Norges lengste jernbanestrekning (se figur 2). For godstransport benyttes i hovedsak 6 diesellokomotiv av typen CD 312, unntaksvis Di 8. CD 312-lokomotivene er produsert av Vossloh og kom i drift på banen i 2010.

Strekningen er karakterisert av lange og stedvis bratte stigninger på hver side av Saltfjellet, har 154 tunneler på tilsammen 47,6 km, og har 361 bruer [2]. Verken tunneler eller bruer har per i dag tilstrekkelig høyde til at konvensjonell elektrifisering kan foretas. Man må i så fall påberegne seg betydelige merkostnader knyttet til utvidelse i form av sprengning for å utvide tunnellop og heving av bruonstruksjoner.

Frekvensen for godstog på strekningen er 2 tog per dag i hver retning. Fra september 2014 kjøres 3 tog i hver retning én dag i uka, totalt 30 enveisturer i uka. Toget har tatt over mye trafikk etter at containerbåt til Bodø ble lagt ned i 2013 og Fauske er blitt et viktigere knutepunkt [3]. Mye av godstransporten går til og fra Oslo og på så lange strekninger er tog konkurransedyktig med vegtransport. Forventningen om at nedleggelsen av containerbåten ville føre til økt transport på veg, slo dermed feil.

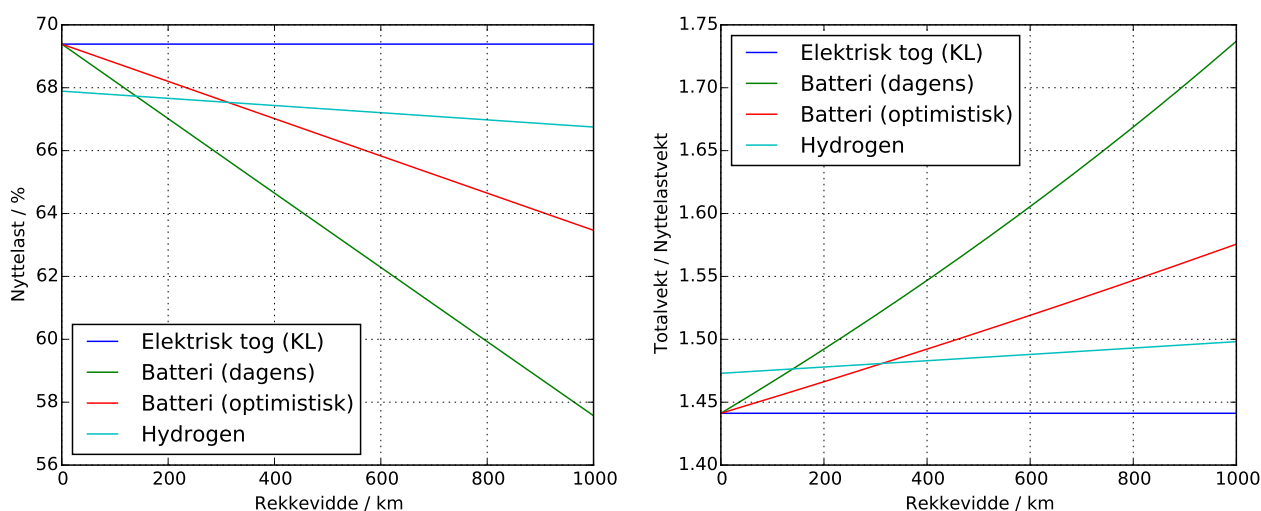
Det er for de nye batteri- og hydrogenkonseptet at det har størst betydning å foreta denne øvelsen, da biodiesel vil være svært likt konvensjonell diesel, og naturgass også har en tilstrekkelig høy energitetthet slik at dette ikke påvirker togets vekt eller volum vesentlig. Utfordringen er at batteriene, brenselcellen og hydrogentankene gjør at nyttelasten reduseres etterhvert som rekkevidden øker.

Gitt dagens energitetthet for Li-batterier og brenselceller/hydrogen og energiforbruket for godstog⁵, er totalvekten av et batteri- og et hydrogentog estimert, under forutsetning av at godskapasiteten holdes konstant (figur 6). Forutsetninger for estimatene er sammenfattet i vedlegg B.

For et godstog med 20 vogner (hver med totalvekt 45 tonn, og nyttelast 34 tonn) og et lokomotiv på 80 tonn (EL16) vil et batteri-elektrisk tog på Nordlandsbanen (med samme nyttelast) veie omlag 11 % mer (ca 1086 tonn) enn et elektrisk godstog med KL (980 tonn). Med en dobling av batterienes energitetthet (som anses som et meget optimistisk scenario) vil batteritog veie 5 % mer (1030 tonn).

⁴PEM-brenselcellen er den celletypen som gir raskest respons når man endrer pådraget (f.eks. ved akselerasjon).

⁵Energiforbruk for godstog ligger på 0,05 kWh/tonn km, iht. NSBs Miljøregnskap 2012 [4]; da NSB regner med tonn *goods*, må dette tallet deles med 3 for å oppnå samme tall referert til total togmasse, siden et godstog er typisk 3 ganger tyngre enn godset det frakter [5, tabell 3.3].



Figur 6: Estimer for maksimal nyttelast i prosent (til venstre) og forholdet mellom totalvekten og nyttelast (til høyre) for batteri- og hydrogentog sammenliknet med et konvensjonelt elektrisk tog med KL som funksjon av rekkevidden. Det forutsettes bruk av dagens teknologi og at batteriene ikke lades / hydrogen ikke fylles underveis. Et optimistisk scenario for batteriteknologi er også inkludert.

For Nordlandsbanen (734 km) trengs det i størrelsesorden 3 containervogner med batterier for dagens teknologi og toget forlenges med rundt 60 meter, hvilket har implikasjoner for krysningsspor. For det optimistiske scenario blir det behov for 2 ekstra batterivogner, og toget blir omlag 40 meter lengre.

Basert på tall fra leverandøren Hydrogenics (en av de ledende i verden på PEM-brenselceller) er tilsvarende vekt for et hydrogentog⁶ inkludert i figur 6. For en total trekraft på 5400 kW, trengs det 27 brenselcelleenheter á 200 kW, med en totalvekt på 22 tonn. Brenselcellene kan dermed plasseres i én godsvogn, med ledig lastekapasitet til overs. I tillegg kommer hydrogentanker på rundt drøye 30 tonn for en rekkevidde på 1000 km, hvorav drøye 3 tonn er hydrogen (ca 10 % av totalvekten av lagringssystemet). Det vil være mulig å lagre ca 2,5 tonn hydrogen på samme godsvogn hvor brenselcellene ble plassert; totalvekten av hydrogentankene med drivstoff vil være rundt 25 tonn, altså innenfor det som containervogneren kan laste. Gitt brenselcellenes effektivitet (som konservativt er estimert til 50 %) vil én godsvogn med hydrogentanker rekke til rundt 750 km, som er akkurat litt over strekningen Trondheim-Bodø. Hydrogentoget vil trenge kun én ekstra vogn (der både brenselceller og hydrogen vil plasseres) og bli omlag 20 meter lengre for Nordlandsbanen (Trondheim-Bodø).

Energieffektiviteten for batterikonseptet er bedre enn for hydrogenkonseptet. Det samme gjelder for kostnader; her forventes batteri-konseptet å bli billigere for korte rekkevidder. Dette skyldes kostnaden for brenselcellene som for hydrogenkonseptet vil være en betydelig investering uansett hvor langt toget skal kjøre. Deretter er det relativt marginale kostnader knyttet til å ta med seg mer hydrogen, mens kostnaden for batterikonseptet øker raskere med rekkevidden, på samme måte som for kurvene i figur 6.

Konklusjoner fra estimer for alternative nullutslippkonsepter Nordlandsbanen

Fra disse foreløpige estimer er det klart at batteriteknologi har sine største fordeler for kortere rekkevidder, mens hydrogen og brenselceller vil være en mer interessant løsning for lengre rekkevidde. Hybride fremdriftssystemer, der batterielektriske biler suppleres med hydrogen/brenselceller, er allerede tatt i bruk innen vegtransport av det franske postvesenet La Poste. Brenselcellesystemet og hydrogentanken ettermonteres på Renaults fabrikk og gir postbilene mer enn dobbel rekkevidde. Varebiler på 3,5 tonn er under uttesting (i 2014) og større lastebiler på opptil 19 tonn med tilsvarende hybridsystem skal testes ut i 2015. Tilsvarende hybride løsninger

⁶Basert på data for HyPM™ HD 180 enhet (198 kW), vekt 720 kg og volum 1120 liter, som gir en gravimetrisk effekt-tetthet 0,25 kW/kg og en volumetrisk effekt-tetthet på 0,175 kW/l [6].



Figur 7: Varebiler med hybrid fremdriftssystem (batterier og hydrogen) på 3,5 tonn er allerede under uttesting av det franske postvesenet, og lastebiler på opptil 19 tonn skal testes ut i 2016 (SymbioFCell/Renault).

forventes å kunne bli meget interessante for fremdrift av tog. Mer detaljerte beregninger for hybride løsninger gjennomføres i fase IIb.

1.3 Evalueringsparametere og vektlegging av underparametere

Evalueringsparametere ble (som beskrevet i avsnitt I.2.2) valgt ut i samråd mellom oppdragsgiver og SINTEF. Hver av disse, deres tilhørende underparametere og vekting er omtalt i påfølgende avsnitt.

1.3.1 Energieffektivitet

Energieffektivitet for hvert av de utvalgte konsepter er det inn i to underparametere. Den første ivaretar effektivitet i drivstoffproduksjon, hvilket har betydning for hvor effektivt energikilden utnyttes fram til den gjøres tilgjengelig for “fylling” på toget. Den andre underparameteren omfatter effektiviteten i selve framdriften av toget. Total-effektiviteten for fremdriftskonseptet er produktet av disse og har enheten $\text{kWh}_{\text{kilde}}/\text{tonn km}$ eller $\text{kWh}_{\text{kilde}}/\text{person km}$. For elektrisk framdrift med kontaktledning (KL) er det valgt at skillet mellom de to underparameterne går mellom Regionalnettet (50 Hz trefase) og omformerstasjonen. For andre drivstoff går skille i det drivstoffet fylles på toget. For batterier, er skille satt mellom ladeenhet og batteri. I Grovanalysen er de to underparameterne gitt hhv 40 % og 60 % vekt.

1.3.1.1 Effektivitet av drivstoffproduksjon

Denne underparameteren har enheten $\text{kWh}_{\text{kilde}}/\text{kWh}_{\text{drivstoff}}$, og inkluderer alle ledd i omvandling av primær energikilde til drivstoffet er om bord i toget. Vi har valgt å gi 1 poeng hvis effektiviteten i drivstoffproduksjonen er 10 % og 10 poeng hvis den er 100 %. Effektiviteten i drivstoffproduksjon for konvensjonelle fossile drivstoff og noen ulike biodrivstoff er vist i tabell 2. For denne studien er effektiviteten i drivstoffproduksjon for 1. generasjons biodiesel på 82 % mot konvensjonell diesel på 94 %, mens 2. generasjon biodiesel har forventes å få en effektivitet i drivstoffproduksjon på 79 %.

1.3.1.2 Effektivitet i fremdrift

Effektivitet i fremdrift har enheten $\text{kWh}_{\text{drivstoff}}/\text{tonn km}$ eller $\text{kWh}_{\text{drivstoff}}/\text{person km}$. Her har vi valgt å gi 1 poeng hvis konverteringen til fremdrift har en effektivitet på 10 % og 10 poeng hvis den er 100 %.

For alle de tre elektriske fremdriftssystemene (elektrifisering (m/KL), batteri og hydrogen) forutsettes det at man benytter fornybare ressurser for elektrisitetsproduksjon, og at virkningsgraden for produksjon av den

Tabell 2: Effektivitet i drivstoffproduksjon [7] er produktet av de to prosentene for ekstraksjon og konvertering.

Energy efficiency	Conv. diesel	Conv. gasoline	E85 1. gen.	E85-1g Sugar beet	E85 2. gen.	Biodiesel 1. gen. RME	Biodiesel 2. gen.
Extraction of raw materials	94 %	94 %	90 %	91 %	96 %	87 %	96 %
Conversion of raw materials	100 %	100 %	81 %	82 %	68 %	94 %	82 %
Total	94 %					82 %	79 %

fornybare energien settes lik 1 selv om maksimal utnyttelse av f.eks. vindenergi er 59,3 % [8]. Solceller er per dags dato rundt 25 % effektive, men det er også her vanlig å se bort fra denne.

1.3.2 Fleksibilitet/Robusthet

Mulighet for gjennomgående rutetilbud er avgjørende for konseptets konkurransevne. Likeledes vil Redundans i rutenettet bidra til at leveranse av gods vil kunne opprettholdes i tilfeller der uforutsette hendelser inntre. Det er disse to underparameterne som inngår i evalueringsparameteren Fleksibilitet /Robusthet. Det er viktig å påpeke at redundans også virker inn på punktlighet som i denne Grovanalysen sorterer under evalueringsparameter Pålitelighet (som er beskrevet i avsnitt I.3.5).

1.3.2.1 Mulighet for gjennomgående rutetilbud

Denne underparameteren er vektet 70 % og ivaretar i hvilken grad materiell kan benyttes på jernbanestrekninger i normal drift. Hvis materiell kun kan benyttes på en strekning og/eller man må bytte lok for alle system gis 1 poeng. Toppscore (10 poeng) gis forutsatt at samme materiell kan benyttes på alle strekninger og dermed gir helt sømløs integrasjon.

1.3.2.2 Redundans i rutenettet

Underparameteren reflekterer konseptets evne til å motstå virkninger av eksterne hendelser som store nedbørmengder, flom, ras, vandalisme (tyveri av ledninger/drivstoff eller ulykker). Togmateriell som kan benytte alternative ruter under uforutsette hendelser/stengning av strekninger gis høy score. Hvis konseptet sikrer at man kan kjøre overalt (full redundans) gis 10 poeng, men hvis dette er begrenset til kun én strekning gis 1 poeng. Da det for de aller fleste strekninger i Norge kun finnes ett alternativ, er denne underparameteren vektet 30 %.

1.3.3 Gjennomførbarhet

Denne parameteren har 4 underparametere som alle er avgjørende for at konseptet skal kunne realiseres. Gjennomførbarhet er en svært tidsavhengig parameter, og forventet utvikling av teknologi og regelverk er derfor viktige faktorer for gjennomførbarhet innen de tre årstallene som er pekt ut for arbeidet i fase II (2021, 2027 og 2050), se avsnitt I.6.

1.3.3.1 Tilgjengelighet av teknologi

Denne underparameteren reflekterer den kommersielle tilgjengelighet av lokomotiv med aktuell drivstoff og framdriftsteknologi, og er gitt 50 % vekt. Score 1 gis hvis konseptet baserer seg på teknologi som er ikke kommersielt tilgjengelig og som det heller ikke er utført reell demonstrasjon av. Score 5 gis under forutsetning av at teknologien har vært demonstrert i flere demonstrasjonsprosjekter og er tilgjengelig, men i begrenset omfang og til høy pris. Full score (10) gis dersom teknologien er utbredt og har vært kommersielt tilgjengelig i mer enn 10 år og drifts- og investeringskostnader er godt dokumentert.

1.3.3.2 Tilstedeværelse av aktører

Denne underparameteren belyser kommersiell tilgjengelighet av verksted/serviceapparat for rullende materiell, drivstoffleverandører og aktører med erfaring fra bygging av infrastruktur og er gitt 20 % vekt. For konsepter der det ikke eller kun finnes et fåtall aktører som tilbyr vedlikehold av rullende materiell og kan etablere infrastruktur, gis 1 poeng. Hvis det finnes aktører utenfor Norge som kan tilby tjenester ved usikkert prisnivå, gis 5 poeng, mens 10 poeng gis hvis det finnes en rekke aktører både innen vedlikehold og etablering av infrastruktur, med reell konkurranse i et velfungerende marked.

1.3.3.3 Mulighet for utarbeidelse av konkurranse-nøytrale ordninger

Et konsepts aktualitet avhenger av om det er mulig å oppnå konkurransenøytralitet mht. transport av gods uavhengig av geografisk beliggenhet. Eksempelvis er det konkurransevridende at leveranse av tømmer fra Østerdalen og Gudbrandsdalen (som foregår med hhv diesel og elektriske tog) får ulik transportkostnad. I grovanalysen ble det i samråd med oppdragsgiver besluttet å vekte denne underparameteren med 0 %, men beholde den som underparameter. Dette fordi den utvilsom vil komme til å bli/være viktig, mens det inntil videre er noe uavklart hvor stor betydning denne vil kunne ha/få.

1.3.3.4 Nødvendig regelverk tilgjengelig

Denne underparameteren anses som et absolutt krav for gjennomførbarhet. Dersom regelverk ikke eksisterer, gis 1 poeng, mens 5 poeng gis hvis regelverk for teknologien er tilgjengelig for andre nærliggende applikasjoner som lastebiler/busser og/eller skip. Dersom regelverk er implementert og standarder er tilgjengelig gis 10 poeng. Underparameteren er i grovanalysen vektet med 30 %.

1.3.4 Miljøkonsekvenser

Miljøkonsekvenser er i Grovanalysen begrenset til å innbefatte globale og lokale utslipp av miljøfiendtlige gasser per tonn-km samt andre mulige skadevirkninger ved eventuelt drivstoffutslipp til jord, vann og luft. Referanser er konvensjonelle diesel- og hel-elektrifiserte tog (med kontaktledning, KL) slik vi kjenner dem i dag. For konsepter der det er snakk om elektrisitet som innsatsfaktor, er CO₂-utslippene satt til null, med basis i at elektrisitet kjøpes inn med opprinnelsesgaranti [9].

1.3.4.1 Globale utslipp

Globale miljøkonsekvenser omfatter CO₂ så vel som andre drivhusgasser (f.eks. metan, CH₄) og definert som CO₂-ekvivalenter. I denne studien er utslipp beregnet for referanse-teknologiene, og de alternative konseptene sammenholdes med disse på en kvalitativ basis. Dagens dieseltog fungerer som referanse mht. CO₂-utslipp, og tilsvarer nedre grense for parameterrommet (1 poeng). Null-utslipp representerer øvre grense for parameterrommet (10 poeng), og dagens elektriske tog (med KL) oppnår derfor toppscore.

1.3.4.2 Lokale utslipp

Lokale utslipp omfatter NO_x, NO₂, SO₂, partikler (PM₁₀), støy og vibrasjoner. EU har per 2012 innført krav til utslipp fra tog under utslippsstandarden Stage IIIB, som er en betydelig innskjerping i forhold til Stage IIIA-kravene. Standarden Stage IV trådte i kraft i 2014, men denne gjelder ikke trekraft for tog. Stage III og IV gjelder kun nytt rullende materiell. Utslippsgrenser for Stage IIIB er vist i tabell 3.

1.3.4.3 Skadevirkning av drivstoffutslipp

Potensielle utslipp av drivstoff til jord, vann og luft og tilhørende skadevirkninger av dette er av vesentlig betydning for de totale miljøkonsekvenser. Spesielt sentralt er eventuelle utslipps blandbarhet og løselighet i

Tabell 3: EUs maksimalgrenser for utslipp fra tog med framdriftseffekt større enn 130 kW [10], gjeldende fra 2012. Alle enheter er g/kWh.

Kategori	CO	HC	HC+NO _x	NO _x	PM
Motorvogner	3,5	0,19	–	2,0	0,025
Lokomotiver	3,5	–	4,0	–	0,025

(grunn)vann. Dersom utslipp er giftig for land og vannlevende organismer (også mennesker), disse har langtidsvirkninger i miljøet, innebærer stor spredningsevne og/eller har lang nedbrytningstid gis lav score. Konsepter som er knyttet til lett håndterlig utslipp med liten spredningsevne gis 5 poeng, mens drivstoffutslipp uten skadevirkninger på miljøet gis 10 poeng. Utslipp av metan (som har omlag 20 ganger høyere drivhuseffekt som CO₂) regnes med her, mens CO₂-utslipp knyttet til forbrenning av metan faller inn under parameteren Globale utslipp (avsnitt I.3.4.1).

I.3.5 Pålitelighet

Pålitelighet er definert som evne til å opprettholde funksjon over tid og unngå/minimere forsinkelser og driftsforstyrrelser/avbrudd. Denne parameteren har to underparametre, togmateriellets driftssikkerhet og punktlighet, vektet hhv med 70 % og 30 %.

I.3.5.1 Driftssikkerhet av togmateriell

Driftssikkerhet av togmateriell defineres ofte som andel tog som er tilgjengelige til enhver tid. Nedre grense for parameterrom (1 poeng) gis for konsepter der 90 % av alle tog forventes å være drift (10 % står på verksted eller er ute av drift grunnet tekniske problemer), mens øvre grense er 99 % i drift.

I.3.5.2 Punktlighet

Punktligheit defineres som spesifikke egenskaper ved alternativene som kan redusere/øke punktligheten. Punktligheten til tog er også avhengig av jernbaneinfrastruktur. Score angis med basis i andel tog som er forsinket mer enn 6 minutter. Dersom andelen overstiger 20 % gis 1 poeng, 10 % gir 5 poeng, mens 1 % gir 10 poeng.

I.3.6 Ressurstilgang

Parameteren ressurstilgang er et mål på hvor lett tilgjengelig drivstoffet er på lokalt, nasjonalt og internasjonalt nivå. Den omfatter også graden av kompleksitet for å levere drivstoffet til jernbanen (logistikk).

I.3.6.1 Tilgjengelighet av drivstoff

Tilgjengelighet av drivstoff vurderes ut fra i hvilken grad det finnes et fungerende marked for drivstoffet. I fravær av et kommersielt marked gis 1 poeng, hvis det kun finnes en leverandør av drivstoff (landsdekkende monopol-situasjon) gis 5 poeng, mens full markedspenetrasjon (ingen begrensninger i drivstoffvolum/effekttilgang) gis 10 poeng. Underparameteren er vektet med 40 % i grovanalysen.

I.3.6.2 Forsyningsikkerhet

Forsyningsikkerhet ivaretar hvorvidt tilgangen avhengig av enkeltland eller geopolitisk stabilitet. Hvis det er lav forutsigbarhet i produksjon/levering, råvaretilgangen er sensitiv til lokale konflikter og/eller drivstoffet produseres i utlandet og kun ved ett eller veldig få produksjonssteder, gis 1 poeng. Dersom drivstoffet produseres i utlandet i land som er vennligsinnet/politisk stabile gis 5 poeng. Full score (10 poeng) gis hvis drivstoffet kan

produseres nasjonalt/lokalt og ny produksjon kan opprettes uten omfattende og tidkrevende investeringsbeslutninger. Dette fordrer også at tilgangen ikke er avhengig av store selskaper eller av råvarer fra politisk ustabile områder. Underparameteren er vektet med 40 % i grovanalysen.

1.3.6.3 Logistikk

Parameteren reflekterer hvor nødvendig det er med et distribusjonsnett langs banenettet, og hvorvidt synergier med andre transportsegmenter eller stasjonær energisektor er til stede. For konsepter der rekkevidden for togene mellom drivstoff-fylling er kort og flere lokale deponier/fyllestasjoner er nødvendig og disse deponiene må etterfylles ofte fra sentrale lagre gis 1 poeng. Tilsvarende gjelder også dersom det er store begrensninger i nettkapasitet som krever investeringer i nett og/eller kraftproduksjon. Full score (10 poeng) gis dersom konseptet gir lang rekkevidde for togene og det kun er nødvendig med få drivstofflager på naturlige "endeholdeplasser" og der det ikke finnes begrensninger i effektuttak/nettkapasitet. Vektet med 20 % i grovanalysen.

1.3.7 Sikkerhet

Risiko⁷ benyttes vanligvis som mål for å avgjøre om sikkerheten er akseptabel. I denne sammenheng vil sikkerhet vurderes utfra de egenskaper det spesifikke konseptet (f.eks. vekt, tyngdepunkt etc.) eller drivstoffet (tetthet, fase (g/l), detonasjonsgrenser i blandinger med luft) har. Da et større antall mennesker vil være utsatt og et uhell/en ulykke vil ha større konsekvenser, er risiko under drift av toget gitt 60 % vekt.

1.3.7.1 Risiko under drift av toget

Denne underparameteren reflekterer risiko for ulykker under drift og ved stasjonsområder. For konsepter som krever mange nye sikkerhetstiltak i forhold til eksisterende løsninger og der det er stor sannsynlighet for ulykker med potensielle dødsfall gis 1 poeng. Dersom risikobilde er tilnærmet uendret sammenliknet med dagens situasjon, gis 5 poeng. Hvis sannsynligheten for drepte/skade er meget liten (langt mindre enn for dagens løsninger), gis 10 poeng.

1.3.7.2 Risiko knyttet til anvendelse av drivstoff og vedlikehold av materiell og infrastruktur

For risiko knyttet til tanking/lading og vedlikehold av materiell og infrastruktur, settes de samme nedre og øvre grenser for parameterrommet som for Risiko under drift av toget (se avsnitt I.3.7.1).

1.3.8 Totalkostnad

Totalkostnad er for en alternativ løsning (et konsept) knyttet til investering i rullende materiell samt drift av denne, og investeringer i infrastruktur og kostnader knyttet til vedlikehold av denne. For jernbaneapplikasjoner er det viktig å skille slik, da infrastruktur ivaretas av andre aktører og tilhørende kostnader dekkes over andre budsjetter enn tilsvarende for rullende materiell. I grovanalysen er hver av underparameterene vektet med 25 %.

1.3.8.1 Investeringskostnad for rullende materiell

Investeringskostnader omfatter kostnader for innkjøp av togmateriell, i form av avskrivning over den forventede levetiden for materiellet. For umoden teknologi, så som batteri- og hydrogenteknologi, forventes investeringskostnadene å være høye og levetiden kortere enn for konvensjonell teknologi.

1.3.8.2 Driftskostnad for rullende materiell

Driftskostnader for rullende materiell omfatter drivstoff- og vedlikeholdsutgifter.

⁷Risiko = Sannsynlighet × Konsekvens.

I.3.8.3 Investeringskostnad for infrastruktur

Kostnader for etablering av infrastruktur inkluderer avskrivning på alt utstyr for produksjon, distribusjon, lagring og fylling av drivstoffet, f.eks. etablering av lagringstanker for flytende eller gassformige drivstoff.

I.3.8.4 Driftskostnader for infrastruktur

Kostnader for drift og vedlikehold av infrastruktur inkluderer reparasjonskostnader og nødvendige, regelmessige oppgraderinger, mens drivstoffutgifter sorterer under driftskostnader for rullende materiell.

I.4 Konsepter for grovanalyse, kort beskrivelse av virkemåte

I påfølgende avsnitt er de ulike konseptene beskrevet kort, og deres respektive fordeler og ulemper diskutert. Vi starter med de to referansekonseptene og har her benyttet Jernbaneverket som kilde.

I.4.1 Konvensjonell elektrisk framdrift (med KL-anlegg, referanse)

Konvensjonell elektrisk framdrift med kontaktledning (KL) er dominerende i Norge i dag. Tilsammen 2500 km av det statlige jernbanenettet er elektrifisert og omlag 80 % av jernbanetrafikken i Norge skjer med elektriske tog. Energiforbruket tilsvarer 500 GWh per år (omlag 0,5 % av Norges elforbruk).

Elektriske tog har en rekke fordeler, derunder større trekraft⁸ (5400 kW, EL18) enn diesel-lokomotiver (3200 kW (Vossloh España, CD 312), samt lavere drifts- og vedlikeholdsutgifter. De er også langt mer effektive og gir ingen utslipp av miljøfiendtlige gasser. Den elektriske energien tilføres lokomotivet gjennom kontaktledningen (KL). Motoren i de elektriske lokomotivene fungerer som generator under oppbremsing, og typisk 10–20 % av den elektriske energien som toget mottar mates tilbake gjennom KL.

Hovedutfordringer knyttet til elektrifisering av ikke-elektrifiserte baner er svært høye investeringskostnader. Bevilgningen for elektrifisering av Trønder- og Meråkerbanen var på 3,9 milliarder NOK (tilsammen 207 km) [11]. På ikke-elektrifiserte baner er det mange tunneler og broer som er for lave til å benytte standard KL-anlegg, og her blir merkostnadene for å øke høyden på tunneler og broer betydelige. Meråkerbanen har kun 1 tunnel, mens Nordlandsbanen nord for Steinkjer har 154 tunneler. For Nordlandsbanen forventes kostnaden for elektrifisering av den resterende delen (604 km fra Steinkjer til Bodø) å bli minst 8 milliarder NOK.

I.4.2 Diesel-elektrisk tog (referanse)

Det finnes to typer diesellokomotiver. Dieseltog er vanligvis dieselelektriske, dvs. at dieselmotoren driver en generator som produserer elektrisitet, og fremdriften ivaretas av elektriske motorer. Dieseltog kan også ha hydraulisk drift, med hydraulisk kraftoverføring for framdrift slik man finner i større dieselmotorkar med hydraulisk girkasse. Skiftelokomotiver har som regel dieselhydraulisk drift, men da denne studien fokuserer på godstrafikk, vil dieselelektriske lokomotiver bli benyttet som referanse-teknologi.

Det er 1395 km jernbane i Norge hvor dieseldrevne tog er eneste mulighet. Da er baner som ikke er i bruk og sidespor ikke medregnet. Banene er ulike med hensyn til hvilke tog som trafikkerer der i dag, noen med diesel-elektriske lokomotiver, andre med diesel-elektriske motorvogntsett (figur 8).

Fordelene med diesel er at drivstoffet er lett tilgjengelig og at rekkevidden er lang. Ulempene er knyttet til lavere trekraft (og dermed akselerasjon) enn elektriske tog, utslipp av partikler og NO_x, og høyere drivstoff- og vedlikeholdskostnader enn elektriske lokomotiver.

⁸Begrepet høyere trekraft må benyttes med omhu. Pga. diesellokomotivenes høyere adhesjonsvekt kan de rent teknisk trekke de tyngste togene. Ytelsen avgjør imidlertid hvor fort det går med samme togvekt, og da særlig i stigninger. For baner med tett trafikk og blandet trafikk er ytelsen viktig siden en er avhengig av at alle togene har ca. samme gjennomsnittlige framføringshastighet for å unngå kapasitetsreduksjon på banen som helhet (B. Ukkeberg, JBV, nov. 2014).



Figur 8: Dieselelektrisk lokomotiv av typen Vossloh España Euro4000, som er i bruk i Norge med betegnelse CD 312.

1.4.3 Batteri-elektriske tog

Batteriteknologi har de siste 20 årene vært inne i en rivende utvikling, mye drevet av behovet for bedre batterier for forbrukerelektronikk. Litium-ion batterier er nå ansett som den mest lovende batteriteknologien for bruk i transportsektoren. Høy spenning er årsaken til Li-ion-batterienes høye spesifikke energitetthet. Høy cellespenning gjør også at det trengs færre celler til et batteri, noe som reduserer produksjonskostnadene og øker påliteligheten. Li-batterier er relativt robuste med lang levetid, så lenge det ikke blir utsatt for høye temperaturer eller overlading. Li-ion-batterier har tynn cellekonstruksjon og lav selvutladning, noe som resulterer i høy energieffektivitet og høy effekttetthet.

El-biler har fått fotfeste i Norge, og mer enn 35 000 kjøretøyer er allerede på veiene⁹. Verdens første helelektriske ferge, bygget av Fjellstrand, ble døpt i Norge 23. oktober 2014. Den økende utbredelsen av batterier i ulike transportsektorer gjør at batterielektriske tog har blitt inkludert blant aktuelle konsepter. I denne grovanalysen er det valgt å se på i) elektrisk tog der all framdrift er basert på elektrisitet lagret i batterier, mens det for fase II (se avsnitt I.6.4) anbefales å vurdere ii) en variant av del-elektrifisering der lokomotivet i utgangspunktet henter elektrisk energi fra et kontaktledningsnett, men i tillegg kan kjøre en lengre distanse (> 100 km) på batterier. Begge disse konseptene vil kunne ta vare på bremseenergi ved å lade batteriene under oppbremsing.

i) Batteritog (fase I) I dette konseptet vurderes et tog hvor all energi til fremdrift hentes fra batteriene om bord i toget. Estimer for Nordlandsbanen er presentert og diskutert i avsnitt I.2.4.

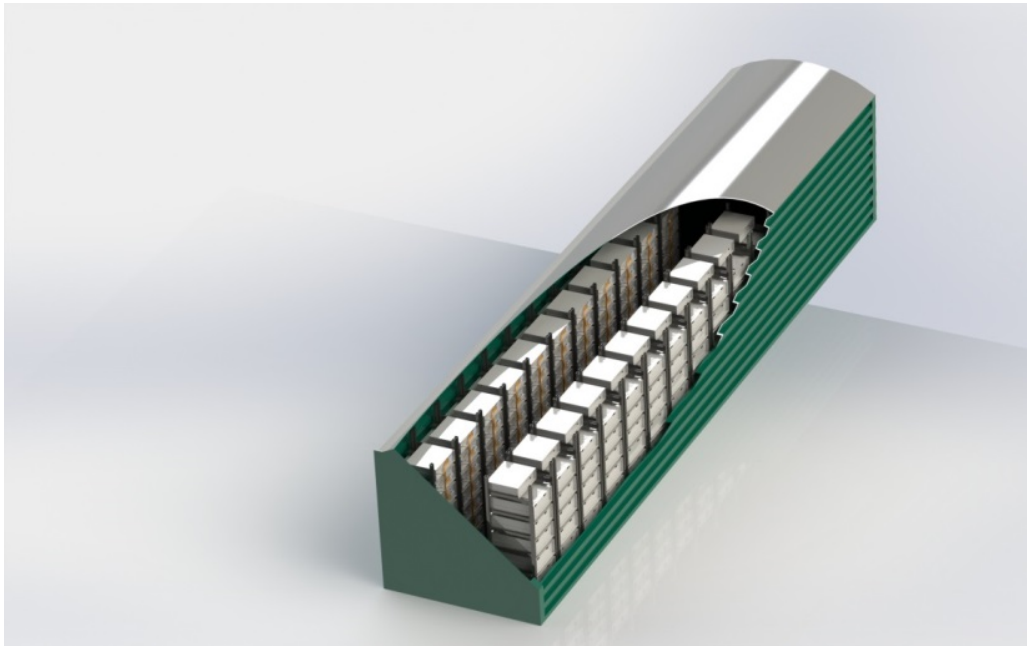
ii) Delelektrisk batteritog (fase II) I fase II foreslås det å evaluere et konsept hvor toget i utgangspunktet får tilført elektrisk energi fra et kontaktledningsnett, men i tillegg kan kjøre en lengre distanse (> 100 km) på batterier. Dette toget kan dermed benytte elektrisitet fra et kontaktledningsnett der dette eksisterer til både framdrift og opplading av batteriet og bruke energien lagret i batteriet på strekninger hvor kontaktledningsnett ikke eksisterer eller er ute av funksjon. Fordelen med dette konseptet, i forhold til et tog basert kun på batterier, er at størrelsen og vekten av batteriene om bord på toget kan reduseres vesentlig samtidig som det fortsatt kan redusere behovet for utbygging av kontaktledningsnett. Toget kan også ha en høyere driftsstabilitet da det også kan forsere strekninger hvor kontaktledningsnett er ute av funksjon.

Bombardier og Network Rail i Storbritannia startet i august 2014 uttesting av et elektrisk persontog med batterier som kan kjøre opp til 50 km på ren batteridrift i IPEMU prosjektet [12].

Dedikerte vogner for batteripakker vil være et naturlig valg, slik GrenlandEnergy har visualisert det (figur 9).

GrenlandEnergy har nylig levert et anlegg til ABB (installert ved SINTEF Marintek) montert i en 6-fots kontainer som kan levere 54 kWh og en effekt på 560 kW. Det trengs da i størrelsesorden 10 slike anlegg for å trekke et godstog med total trekraft på rundt 5400 kW. Utfordringen ligger imidlertid i energimengden som trengs for lengre distanser (se estimer i avsnitt I.2.4).

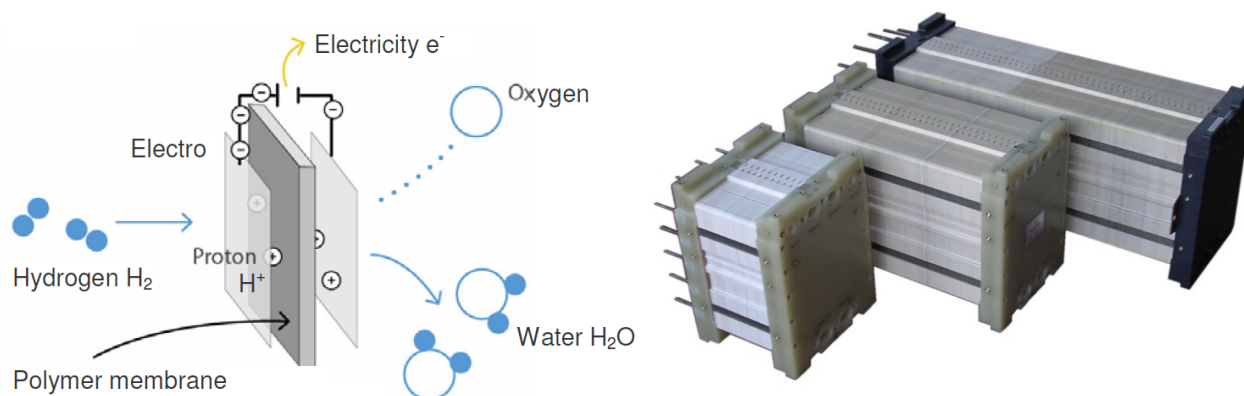
⁹Antall registrerte elbiler (og ladbare hybrider) oppdateres jevnlig på Grønn bil: <http://www.gronnbil.no/statistikk/>.



Figur 9: Batteri-konsept tilpasset togvogn slik GrenlandEnergy ser for seg at det kan sammenstilles.



Figur 10: NorLed fergeløsning (Siemens), 2×500 kWh (150 kVA), tilsvarende 1 MWh elektrisk energi lagret. Skroget til batteriferja som skal settes i drift over Sognefjorden ved årsskiftet 2014/15, her på slep fra verftet i Gdansk (Polen) til Omastrand der den skal utrustes [13].



Figur 11: Prinsippet for en brenselcelle (til venstre) og eksempler på cellestakker (til høyre) der opp til noen hundre celler er satt sammen for at enheten skal gi den spenning og strøm som applikasjonen krever.

1.4.4 Hydrogen

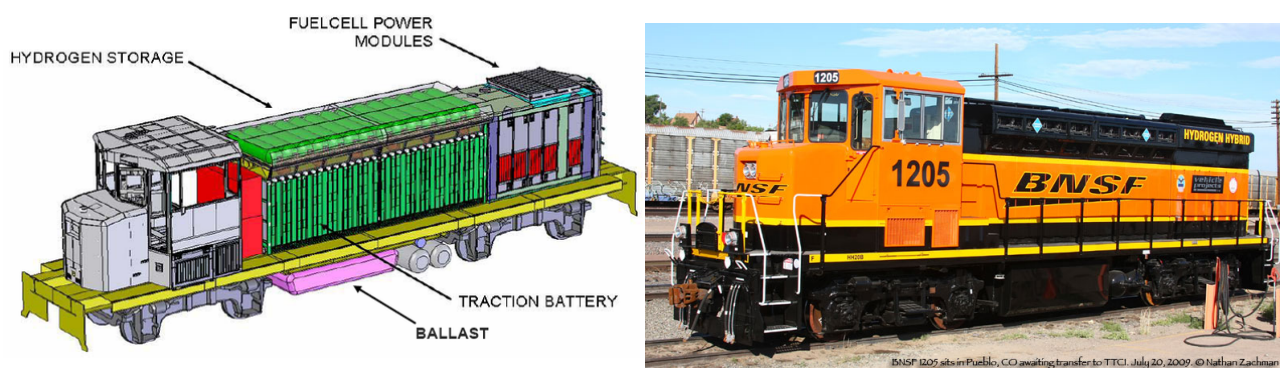
Hydrogen er i likhet med elektrisitet en energibærer. Det betyr at hydrogen kan brukes til å lagre, transportere og levere energi. Hydrogen er også en fleksibel energibærer siden gassen kan produseres fra alle typer energikilder. Hydrogen kan produseres fra strøm ved elektrolyse (spalting) av vann eller ved reformering av naturgass. På sikt vil fornybar energi fra for eksempel vind, sol og biomasse være hovedkildene for hydrogenproduksjon. Hydrogenteknologi har vært under utvikling i snart 200 år. Det som virkelig gjør hydrogen til en aktuell energibærer er brenselceller. Brenselcellene konverterer hydrogenets kjemiske energi til elektrisitet og varme. Restproduktet er rent vann (se figur 11). Virkningsgraden i en brenselcelle er høy (55–65 %) sammenlignet med andre teknologier for konvertering av kjemisk energi, og da spesielt sammenliknet med forbrenningsmotorer som i store maritime enheter når virkningsgrader opp mot 50 % ved optimal belastning.

Det er viktig å understreke at batteri- og hydrogenkonseptene i likhet med elektriske tog (m/KL) er elektriske tog, der en elektromotor står for selve fremdriften. Forskjellen mellom batteri- og hydrogenkonseptet er at energien lagres på ulike måter. For hydrogenkonseptet lagres energien i form av trykksatt hydrogengass, i en tank som er separat fra den energikonverterende enheten (brenselcellen), mens i batteriet befinner de energirike materialene i samme enhet som der energikonverteringen foregår. Dette har konsekvenser for sikkerheten, som for brenselcellesystemer økes ved at tilførsel av hydrogen stoppes så snart en feilmelding registreres, for på den måten å minimere mengde brennbar gass som vil være utsatt for antennelse.

Innen transportsektoren kan hydrogen minske miljø- og klimautslippene betydelig. Hydrogen som drivstoff har ikke andre utslipp enn ren vanddamp. En overgang fra tog drevet av diesel eller andre fossile energikilder til hydrogen vil kunne forbedre luftkvaliteten og redusere klimagassutslipp. På samme måte som miljøpåvirkningen for elektriske tog er avhengig av hvordan man produserer strømmen, er den for hydrogentog avhengig av hvordan hydrogenet blir produsert og distribuert. Som for batteri- og elektriske tog med kontaktledning, er det i denne grovanalysen forutsatt at hydrogen produseres ved vannspalting ved bruk av elektrisitet med opprinnelsesgaranti.

Som alle andre drivstoff har hydrogen en høy energitetthet og det gjør at gassen må håndteres riktig for at den ikke skal utgjøre en høy risiko. Hydrogen har imidlertid blitt håndtert industrielt i mer enn 100 år og gode rutiner for bruk og risikoeliminering eksisterer. Som et eksempel har det i de siste årene blitt utviklet internasjonale standarder for bygging og drift av hydrogenstasjoner for personbiler og busser samt standarder for fylling av hydrogen ved trykk opp til 700 bar.

Hydrogen og brenselcelleteknologi er en modulær teknologi, noe som gjør at brenselceller og hydrogenlagringssystemer som blir utviklet for personbiler, busser og lastebiler også kan benyttes på tog. Dette gjør det mulig å redusere kostnadene grunnet store produksjonsvolumer. Tog som er drevet av hydrogen og brenselceller vil ha en elektrisk drivlinje på lik linje med elektriske tog som forsynes med energi fra et kontaktledningsnett eller batterielektriske tog. Siden drivlinjen er elektrisk vil hydrogentog også ha et batteri installert som kan gi



Figur 12: Hydrogendrevet tog fra BNSF, USA.

ekstra effekt ved akselerasjon og ta vare på bremseenergi.

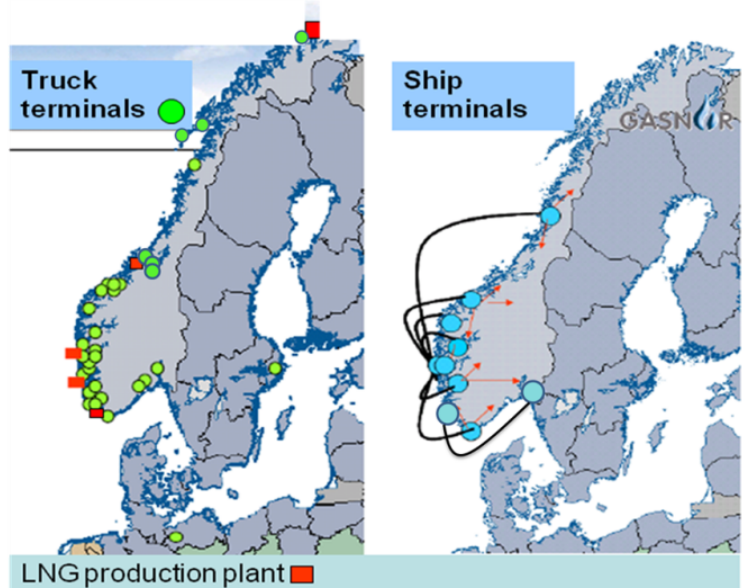
Utvikling av hydrogentog har fram til nå hatt lavt fokus sammenlignet med satsingen som har vært på personbiler og busser. Interessen har imidlertid vokst de siste årene og verdens første persontog blir nå bygget i Niedersachsen, Tyskland, av Alstom. I følge avtalen mellom Alstom og tre regioner i Tyskland (Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen og Baden-Württemberg) som ble undertegnet under InnoTrans-messen i september 2014, skal 2 tog bygges innen utgangen av 2018 og i størrelsesorden 40 slike togsett skal settes i drift innen 2020.

1.4.5 Naturgass

Det er i dag tre småskala produksjonssteder for LNG på Vestlandet, (Kolsnes, Snurrevarden og Risavika) og et større LNG anlegg på Melkøya og naturgass distribuert som LNG er blitt kommersielt tilgjengelig for dedikerte brukere over hele landet. I transportsektoren er naturgass tatt i bruk innenfor kollektivtrafikken og maritim sektor, men det kjøres ingen gassdrevne tog i Norge i dag. Det har derimot vært banebrytende aktivitet i Norge mht. etablering av regelverk for bruk av naturgass (i flytende form, LNG) som drivstoff i skip. Den første gassdrevne ferjen (M/F Glutra) kom allerede i drift i februar 2000, og siden har dette bredt om seg og i dag er det ca. 50 skip som benytter naturgass som drivstoff i norske farvann, i hovedsak ferger og supply, men også andre fartøyer (ROPAX, frakteskip og slepebåt). Det er for tiden en rivende utvikling og stadig flere leverandører leverer store naturgassmotorer [14]. Norske Fjordline er blant de første som har tatt i bruk naturgassdrevne motorer i sine store ferjer (ROPAX) som i dag opererer mellom Norge og Danmark. I Canada er naturgassdrevne tog tatt i bruk ifm. utvinning av oljesand [15], se figur 15. Det forventes at regelverket for bruk av naturgass i skip, vil



Figur 13: Alstom har inngått avtale om å levere 2 stk brenselcelletog til uttesting i Niedersachsen i 2018, og forventer å skulle levere i størrelsesorden 40 togsett innen 2020.



Figur 14: Tilgjengelighet av naturgass i Norge, kilde: Gasnor, Skangass, MARINTEK 2012.

kunne danne grunnlag for at tilsvarende kan komme på plass for anvendelse innen jernbanen relativt raskt.

Naturgass kan lagres og distribueres enten som trykksatt gass eller i flytende form. I denne grovanalysen lagres gassen ombord i flytende form og omsettes i forbrenningsmotorer ombord i lokomotivet. Det vil kunne oppnås betydelige miljømessige fordeler ved å erstatte diesel med naturgass, spesielt når det gjelder utslipp av partikler og NO_x som så godt som elimineres. General Electric tilbyr ombygging av diesel-lokomotiver til naturgass [16] (se figur 15). For ombygde dieselmotorer reduseres partikkel- og NO_x -utslippene med mer enn 90 %, mens CO_2 -utslippene er tilnærmet de samme for naturgass som for diesel. Spesialbygde naturgass-motorer kan utvikles med minst like høy virkningsgrad som tilsvarende dieselmotor og kan bedre utnytte at naturgass har lavere karboninnhold per energienhet enn diesel, og CO_2 -utslippet kan reduseres med 10–20 %.

1.4.6 Biodiesel

Det finnes en rekke biobaserte drivstoff (biogass, metanol, etanol, diesel m.fl.) for anvendelse i transport. Biodiesel har vært i bruk i ulike deler av verden i nærmere 30 år. Jernbaneverket gjennomførte en utredning for bruk av biodiesel ved jernbane i 2006 [17]. Denne konkluderte med at det er mulig å blande inn opptil 50 % 1. generasjons biodiesel i konvensjonell diesel, hvis man tar de forholdsregler som gjelder for flytegenskaper om vinteren.



Figur 15: Naturgassdrevet tog i Alberta, Canada (til venstre). General Electrics ombygde diesellokomotiv til naturgass (til høyre).



Figur 16: Test av 20 % biodiesel-innblanding.

Kost/nytte avhenger av hvilken energikilde som benyttes for fremstilling av biodieselen. Det utarbeidet en skisse til et slikt prosjekt. Logistikk, miljø, lokomotivenes trekraft og økonomi var blant de aspektene utredningen fokuserte på.

Biodiesel gir betydelige kutt i CO₂-utslipp sammenliknet med fossilbasert diesel. For 1. generasjon produksjonsteknologi, anslås en reduksjon på 60 % [18], mens 2. generasjons drivstoff kan redusere CO₂-utslipp med inntil 90 % [19]. Andre generasjons biodrivstoff er produsert fra trevirke; diesel-lignende drivstoff kan produseres med flere teknologier. Innblanding av inntil 100 % 2. generasjon biodiesel (B100) er mulig siden drivstoffets egenskaper er identisk med konvensjonell diesel. Det er valgt å vurdere 1. generasjon biodiesel i denne grovanalysen, da 2. generasjons biodiesel ikke er tilgjengelig i dag.

FAME-basert biodiesel¹⁰ kan omsettes i konvensjonelle forbrenningsmotoren, men avhengig av energikilden biodieselen er fremstilt fra kan det dannes avleiringer i motorene, som øker slitasjen og reduserer virkningsgraden noe. Graden av avleiringer øker desto større andel flerumettede fettsyrer dieselen inneholder [17]. Det stilles også høye krav til renhet, spesielt i motorer som opererer ved høye trykk (CommonRail-teknologi), og dette krever at filtrering/rensing må inngå i produksjonsprosessen.

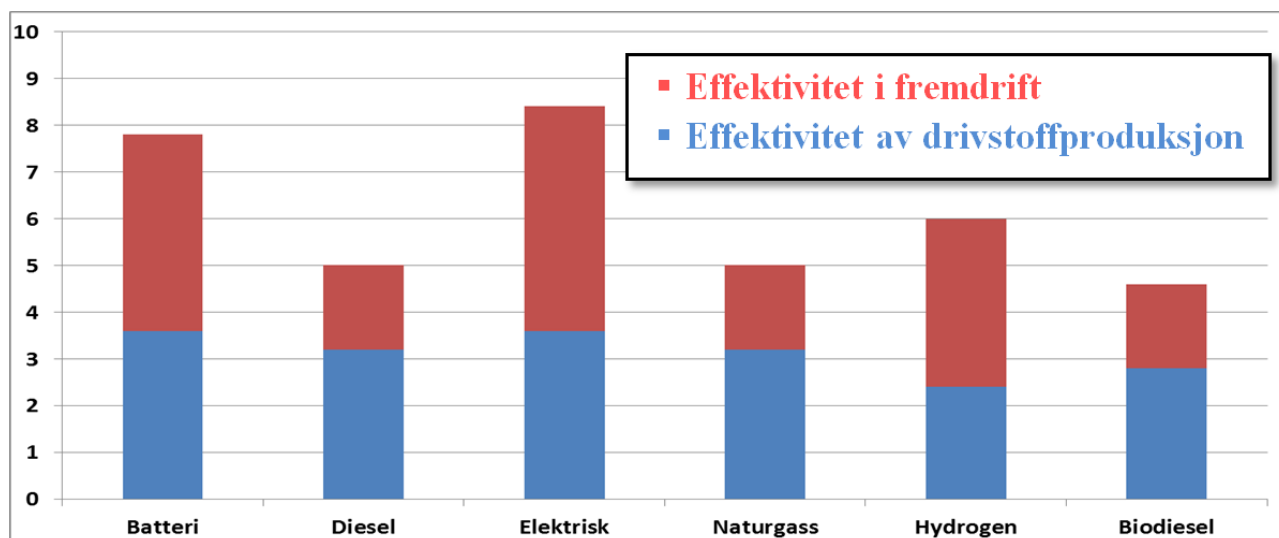
Biodiesel er blitt tatt i bruk i store forbrenningsmotorer for busser, lastebiler og vogntog med godt resultat. Biodiesel ble første gang testet ut som drivstoff i tog i 2007 [20]. Noen produsenter av lokomotiver har også modeller for biodiesel, men tilbudet er begrenset.

Knyttet til utfordringene nevnt over, er innblanding av biodiesel i konvensjonell diesel fremdeles det vanligste (f.eks. 20 %, B20). Amerikanske Amtrak [21] gjennomførte et ett-års prøveprosjekt i 2010/2011 og konkluderte med at innblandingen ikke hadde noen negative effekter på materiellet (figur 16). Lagring av biodiesel er forbundet med større utfordringer enn for konvensjonell fossilbasert diesel. Metylesters høye oksygeninnhold gjør at biodiesel brytes ned selv i lufttette tanker. Nedbrytningen er temperaturavhengig og fremskyndes kraftig av lys. Lagring av biodiesel over 6 måneder bør unngås, og dette virker inn på logistikk. Norge har egnede energiresurser for produksjon av biodiesel, så som fiske- og slakteavfall. Vår meget lange kystlinje og vårt klima gjør at produksjon av biodrivstoff basert på utnyttelse av marine ressurser som tang og tare ligger godt til rette for Norge.

1.5 Resultater og diskusjon

I dette avsnittet er resultater og innbyrdes rangering av konseptene for hver hovedparameter presentert. Generelle forutsetninger for grovanalysen er angitt i avsnitt I.2.3, og hver parameter er nærmere beskrevet under avsnitt I.3 (Energieffektivitet i avsnitt I.3.1 osv.).

¹⁰1. generasjon er produsert fra vegetabiliske eller animalske oljer, og omsettes som fatty acid metylester (FAME).



Figur 17: Resultater for energieffektivitet, underparameteren Effektivitet i fremdrift er vektet 60 %.

1.5.1 Energieffektivitet

Energieffektivitet er et mål på hvor effektivt den primære energikilden utnyttes i konseptet, i et 'kilde til hjul'-perspektiv, og inkluderer produksjon, transport og bruk av drivstoffet. Det er valgt å skille mellom *Effektivitet i fremstilling av drivstoffet*, og *Effektivitet i fremdrift av toget* (slutt-leddet). Alle ledd i kjeden der det foregår konvertering (oppgradering /rensing) eller omforming (spenning, frekvens) er beheftet med tap. Resultatene for energieffektivitet for de utvalgte konseptene er vist i figur 17.

Det er stor spredning i energieffektivitet for de ulike konseptene. Konvensjonell elektrisk framdrift og batterielektrisk framdrift kommer best ut, mens hydrogen også gir relativt høy energiutnyttelse. Diesel, naturgass og biodiesel ligger alle noe lavere, og dette er primært knyttet til lavere effektivitet i fremdrift, der man for alle disse tre konseptene benytter forbrenningsmotor¹¹. Biodiesel kommer noe lavere ut enn konvensjonell diesel og naturgass, og dette skyldes lavere effektivitet i drivstoffremstilling. Hydrogen skiller seg fra diesel og naturgass ved at effektiviteten i fremstilling av hydrogen er lavere, mens effektiviteten i fremdrift av toget er betydelig høyere. Hydrogens høyere utnyttelse i fremdrift skyldes brenselcellenes høyere effektivitet, sammenliknet med forbrenningsmotor.

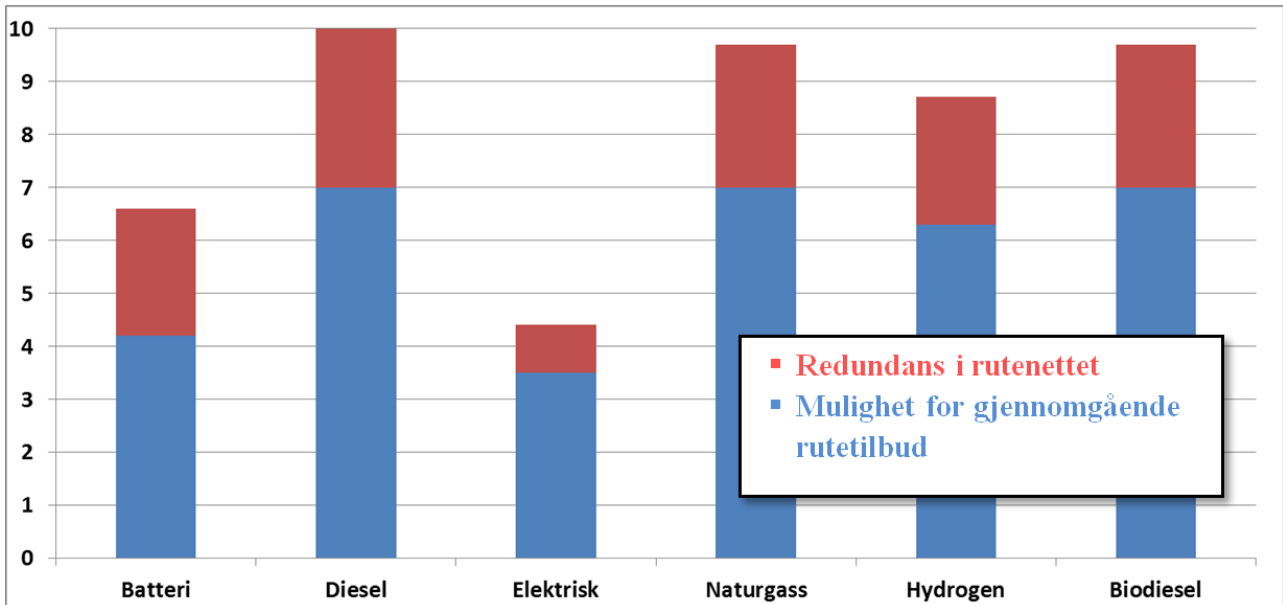
Selv for konvensjonell elektrisk framdrift (med KL) og batteritog er tapene vesentlige, og totaleffektiviteten ligger på rundt 80% forutsatt at man benytter fornybare ressurser for elektrisitetsproduksjon, og at man ser bort fra tapene i produksjon av den fornybare energien. Energieffektivitet er spesielt viktig for operatører, da deres driftskostnader for flere av konseptene er nært knyttet til drivstoffutgifter. Høyere effektivitet gir direkte reduksjon i driftsutgifter, og dette er den primære drivkraften for innfasing av hybridiserte fremdriftssystemer.

1.5.2 Fleksibilitet/Robusthet

Fleksibilitet/Robusthet av et konsept vurderes ut fra dets evne til å kunne ivareta oppgaven med å levere gods under normal drift, samt løsnings evne til å motstå virkninger av eksterne hendelser (f.eks. flom, ras) eller ulykker og der tilhørende stengning av strekninger. Togets konkurransevne er sterkest for lange strekninger (sammenliknet med vegtransport), og påvirkes betydelig av om man kan benytte samme materiell langs hele strekningen. De to underparameterne som inngår i evalueringsparameteren Fleksibilitet/Robusthet er *Mulighet for gjennomgående rutetilbud* og *Redundans i rutenettet* (se figur 18).

Bortsett fra Elektriske tog (med KL) er alle de vurderte konseptene robuste og gir høy fleksibilitet under normal drift. Diesel-, naturgass- og biodiesel-konseptene kan kjøre langs alle jernbanestrekninger forutsatt at

¹¹Effektiviteten for forbrenningsmotorer er underlagt Carnot-begrensningen (bestemt av termodynamikkens lover). For store stempelemotorer kommer man i dag maksimalt opp i drøye 40% for konvertering av diesel- og naturgass.



Figur 18: Resultater for Fleksibilitet/Robusthet der 10 er best; *Mulighet for gjennomgående rutetilbud* er vektet 70 %.

sporene og signalanlegg er intakt. Alle tre konseptene kan også benyttes på lange strekninger og dermed bidra til å styrke togets konkurransevne. Naturgass og Biodiesels litt lavere score på *Redundans i rutenettet* er knyttet til begrenset tilgang på drivstoff sammenliknet med diesel. Batteri- og Hydrogentog forventes også å være fleksible og robuste, men scorer noe lavere knyttet til deres respektive behov for infrastruktur (hhv. Ladestasjoner/bytte av batterivogner og tilgang på hydrogen). Dette gir lavere redundans i rutenettet og begrenser muligheten for gjennomgående rutetilbud, spesielt for Batteritog-konseptet grunnet begrenset rekkevidde (se avsnitt I.2.4).

Elektriske tog skiller seg ut ved å ha betydelig lavere score på denne parameteren enn de andre alternativene fordi det er en forutsetning at alle strekninger er elektrifiserte for at disse skal kunne kjøre overalt, samt at kontaktledning (KL) er spesielt sårbar for ytre påvirkning.

Det understrekes at *Redundans i rutenettet* er en underparameter som må vurderes med omhu i Norge, da det for de aller fleste strekninger kun finnes ett alternativ i Norge (bortsett fra på strekningene Oslo-Lillestrøm-Hamar/Elverum-Støren, Sarpsborg-Ski, Oslo-Hønefoss og Drammen-Nordagutu).

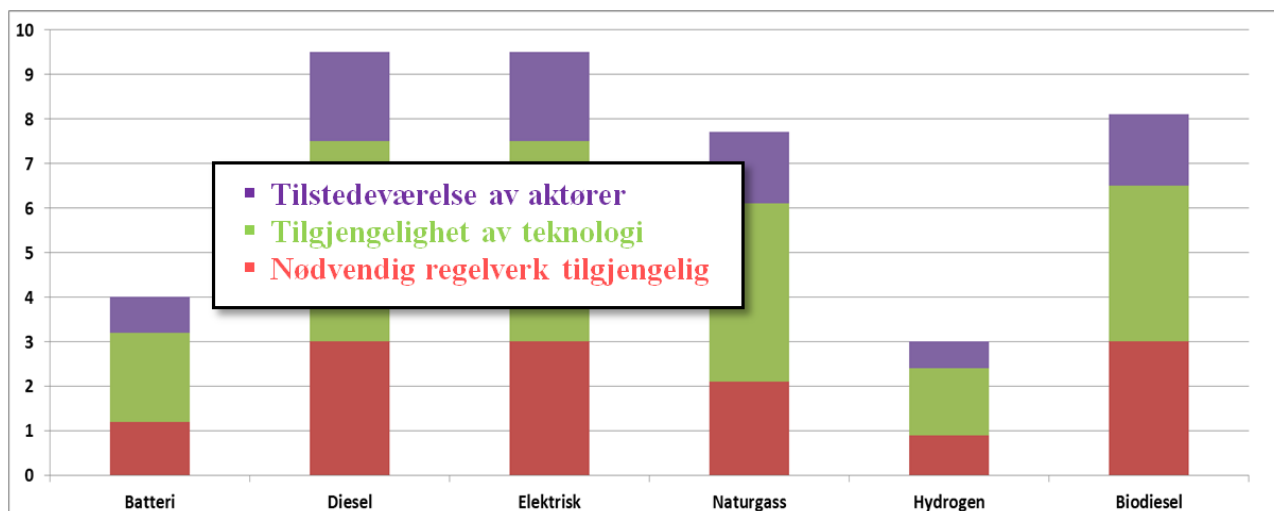
Parameteren Fleksibilitet/Robusthet har betydning for de ulike løsningenes bidrag til å styrke togets konkurransevne, og denne er dermed relatert til parameteren Gjennomførbarhet (avsnitt I.5.3), der *Mulighet for utarbeidelse av konkurransenøytrale ordninger* er en av 4 underparametere.

1.5.3 Gjennomførbarhet

Denne parameteren har 4 underparametere som alle er avgjørende for at konseptet skal kunne realiseres:

- Tilstedeværelse av aktører (20 %)
- Tilgjengelighet av teknologi (50 %)
- Nødvendig regelverk tilgjengelig (30 %)
- Mulighet for utarbeidelse av konkurranse-nøytrale ordninger (0 %)

Fortsatt drift med konvensjonelle diesellokomotiver på ikke-elektrifiserte jernbanestrekninger er (som forventet) vurdert som det enkleste å gjennomføre. Elektrifisering scorer også høyt på gjennomførbarhet, men forutsetter naturligvis at finansielle ressurser gjøres tilgjengelig for de betydelige investeringene dette krever.



Figur 19: Resultater for parameteren Gjennomførbarhet.

Sammenliknet med diesel, er det begrenset mulighet for utarbeidelse av konkurransenøytrale ordninger som gjør at elektrifisering scorer litt lavere. Til tross for begrenset tilgjengelighet av teknologi (rullende materiell og infrastruktur) er innfasing av Biodiesel og Naturgass som drivstoff for tog mulig å gjennomføre innen få år.

Det går et markant skille mellom Batteri- og Hydrogen- og de resterende fremdriftskonseptene mht. gjennomførbarhet per i dag. Store industriselskaper som Siemens er imidlertid engasjert, og prøvedrift med batterikonsepter bør kunne realiseres innen en 2–3-årsperiode, basert på at Norges første batteridrevne ferje (Ampere av Stavanger) settes i drift fra årsskiftet 2014/15.

Gitt dagens manglende tilgjengelighet av brenselcelleteknologi i MW-klassen for transportanvendelser, den svært begrensede infrastrukturen for hydrogen og behov for å utvikle og tilpasse regelverk for hydrogen som drivstoff, er det prematurt å fase inn hydrogen-drevne brenselcelletog nå. Det er imidlertid nylig inngått en avtale mellom industriselskapet Alstom og tyske regionale myndigheter i Niedersachsen om uttesting av 2 hydrogendrevne motorvognsett fra 2018. Planen er å produsere et 50-talls slike tog årlig fra 2020. Det forventes at Hydrogendrevne lokomotiver for godstog vil kunne realiseres innen 2027.

Gjennomførbarhet er en svært tidsavhengig parameter, og forventet utvikling av teknologi og regelverk er derfor viktige faktorer for gjennomførbarhet innen de tre årstallene som er pekt ut for arbeidet i fase II (2021, 2027 og 2050), se avsnitt I.6.

1.5.4 Miljøkonsekvenser

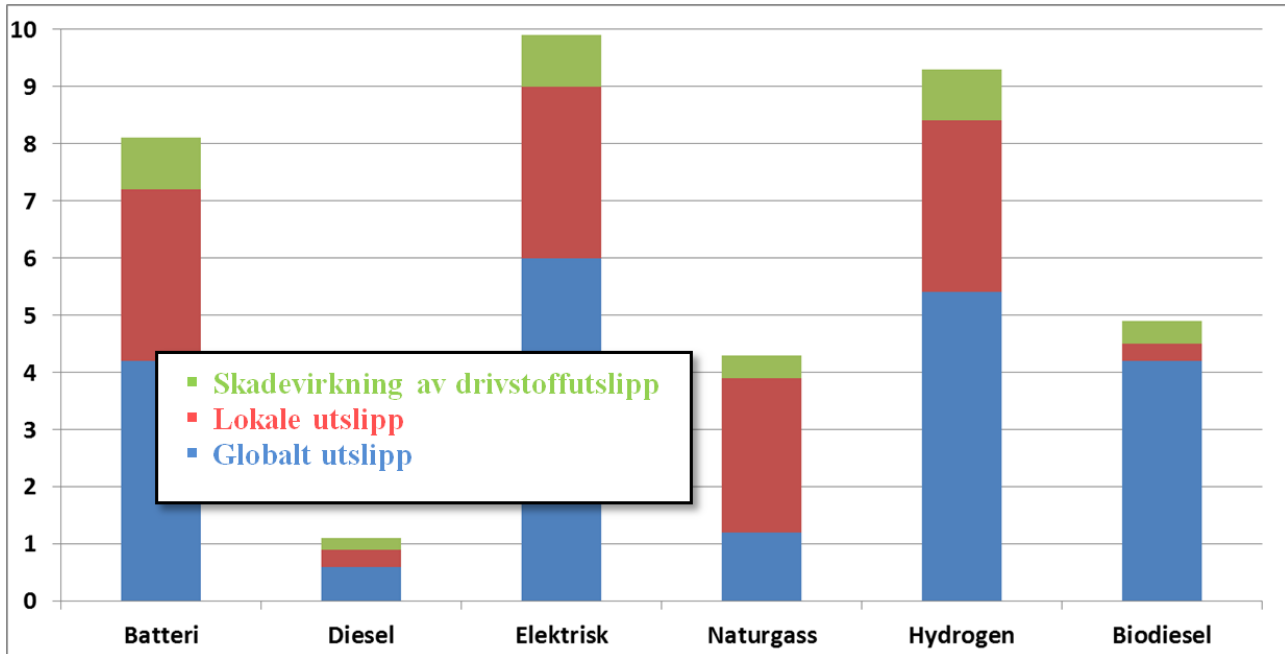
Miljøkonsekvenser er skilt i globale og lokale utslipp av miljøfiendtlige gasser samt andre mulige skadevirkninger ved eventuelt drivstoffutslipp til jord, vann og luft (se figur 20).

Resultatene for denne har størst spredning av de utvalgte parameterne. Batteri-, Elektrisk-, Hydrogen og Biodiesel-konseptene scorer alle høyt på globale utslipp (lave CO₂-utslipp). Forskjellene ligger i CO₂-utslipp knyttet til batteriproduksjon (ved lave produksjonsvolumer¹²) og transport av hydrogen (som er mindre energitett enn f.eks. naturgass). Bio-diesel scorer totalt middels da dette konseptet har de samme lokale utslipp av NO_x og partikler¹³ som konvensjonell diesel. For eventuelle utslipp til omgivelsene scorer biodiesel, som er en metylester, noe bedre enn petroleum-diesel, da denne er lettere nedbrytbar og gjør mindre skade ved spill i naturen.

Metan (hovedkomponenten i Naturgass) har ca 20 ganger sterkere klimaeffekt enn CO₂, og selv om sannsynligheten er lav for ukontrollerte utslipp, trekker dette ned total-scoren for miljøkonsekvenser for Naturgasskon-

¹²Produksjon av batterier er beheftet med noe høyere CO₂-utslipp enn konvensjonelle forbrenningsmotorer. Dette er knyttet til utvinning og oppgradering av materialene som benyttes i batteriene og at produksjonene foregår i mindre skala.

¹³Dagens dieseltog er ikke utstyrt med partikkelfilter, men dette vil trolig bli et krav innen få år.



Figur 20: De ulike konseptenes miljøkonsekvenser. NB: Høy score betyr lav negativ miljøpåvirkning.

septet. Det er viktig å merke seg at det er totalt ulike årsaker til at Naturgass og Biodiesel kommer omtrent likt ut i totalvurderingen; mens naturgass har neglisjerbare lokale utslipp (og dermed scorer høyt på lokale utslipp) er det reduksjonen i de globale utslippene om gjør Biodiesel til et miljømessig akseptabelt alternativ.

1.5.5 Pålitelighet

Pålitelighet er definert som evne til å opprettholde funksjon over tid og unngå/minimere forsinkelser og driftsforstyrrelser/avbrudd. Denne parameteren har to underparametre, togmateriellets driftssikkerhet og punktlighet.

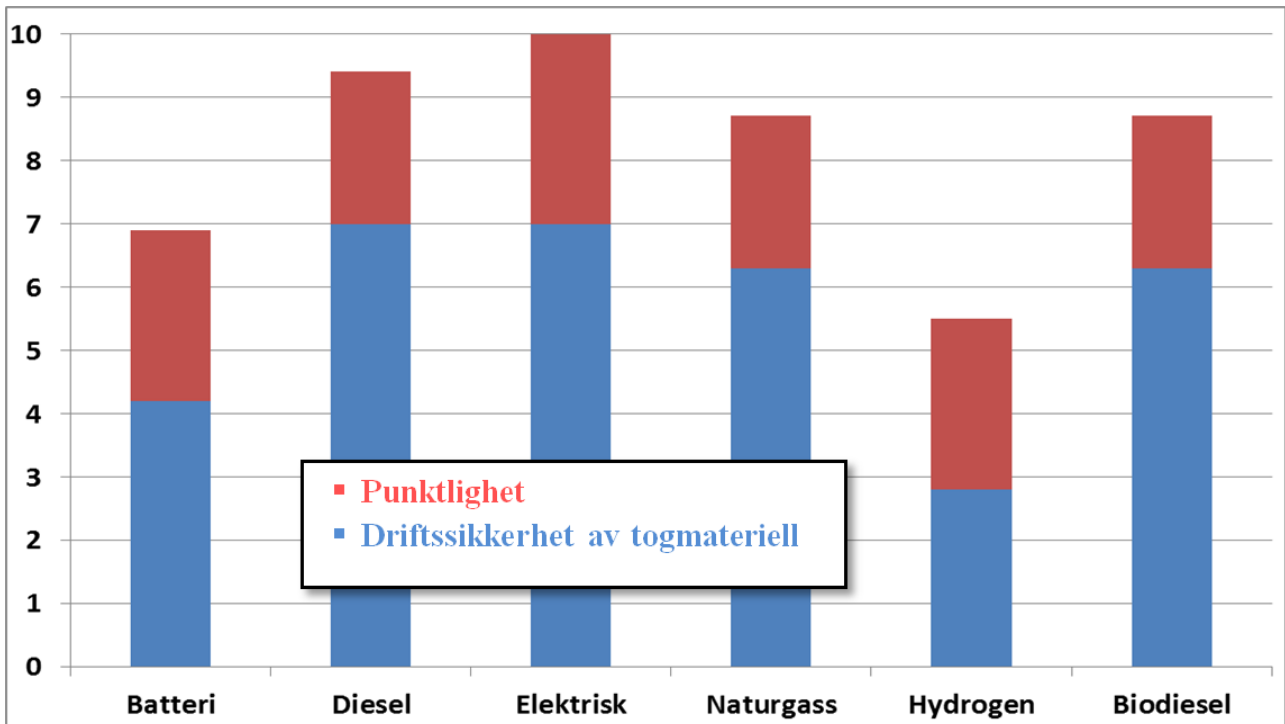
Det er den forventede Driftssikkerheten av togmaterieell for de ulike konseptene som gir det største utslaget i totalresultatet for denne parameteren. Påliteligheten er høyest for Diesel- og elektriske tog. Biodiesel scorer marginalt lavere (men fremdeles meget høyt) knyttet til at biodiesel kan inneholde komponenter som gir litt mer avleiringer i forbrenningen. Det er mindre variasjon i den forventede punktligheten. Høyere trekraft for elektrisk drevne tog (Batteri-, Elektrisk (m/KL) og Hydrogen) gjør at disse konseptene har større evne til å hente inn mindre forsinkelser enn Diesel, Naturgass og Biodiesel.

Det er viktig å påpeke at Batteri-, Naturgass og Hydrogenkonseptenes pålitelighet forventes å øke betydelig knyttet til rivende teknologisk utvikling. Innen 2021 vil trolig alle disse tre konseptene kunne vise til samme driftssikkerhet som de konvensjonelle dielsel- og elektriske tog har i dag.

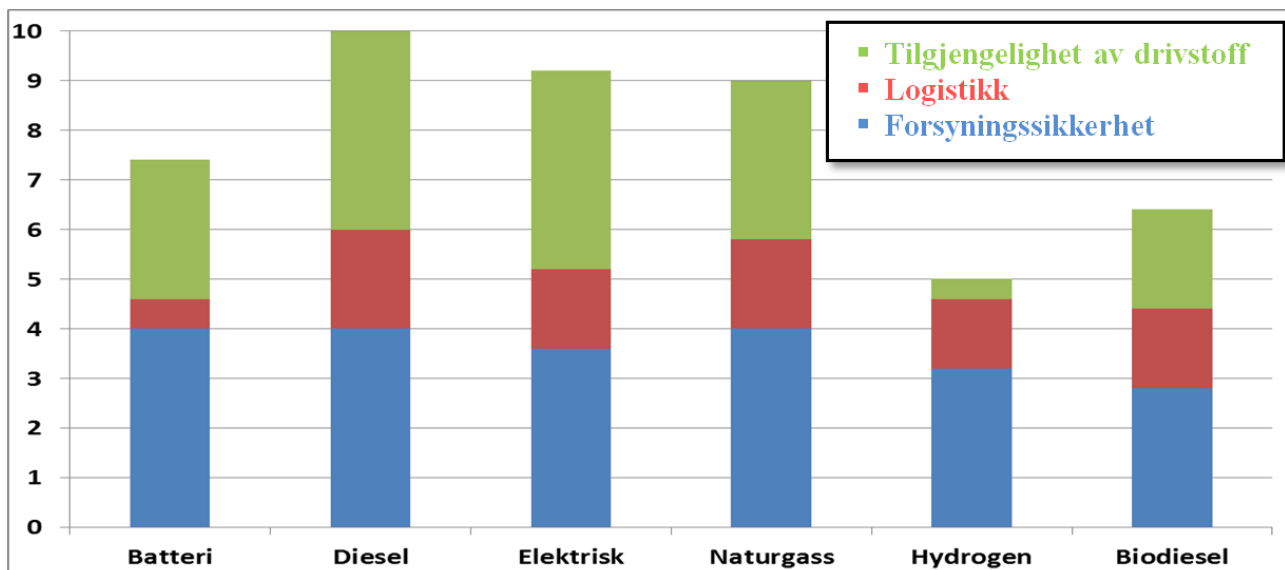
1.5.6 Ressurstilgang

Parameteren ressurstilgang er et mål på hvor lett tilgjengelig drivstoffet er på lokalt, nasjonalt og internasjonalt nivå. Underparametre (og tilhørende vektning) er *Tilgjengelighet av drivstoff* (40 %), *Logistikk* (20 %) og *Forsyningssikkerhet* (40 %).

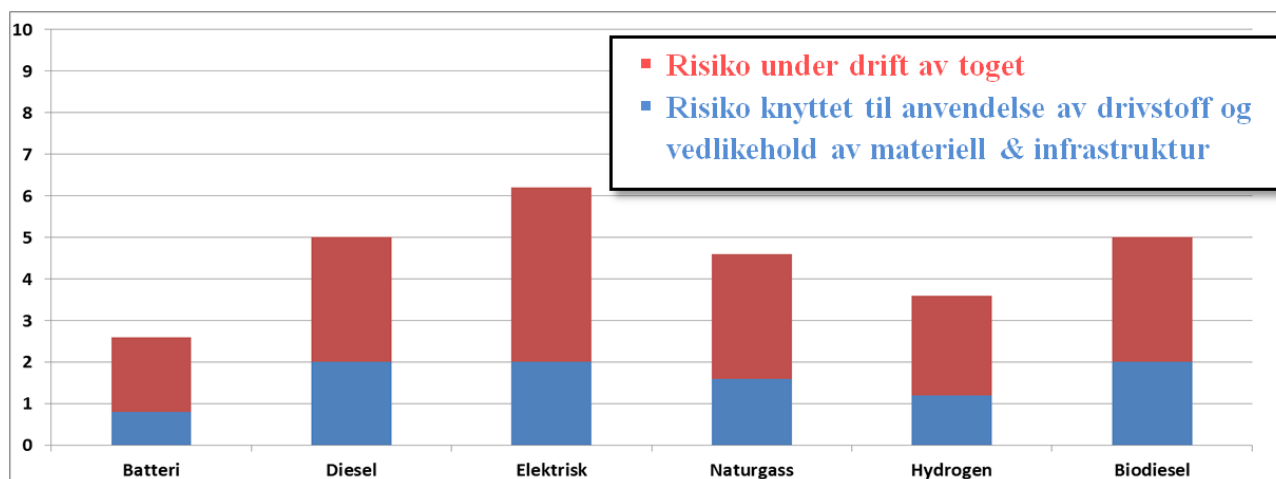
Det er stor spredning i resultatene for parameteren ressurstilgang. De konvensjonelle løsningene som benyttes i dag, samt Naturgass kommer best ut. Logistikk-utfordringer og begrenset Tilgjengelighet av ladestasjoner (krever sterkt/oppgradering av lokalnett) er med å trekke Batteri-konseptets totalscore ned. Tilgjengelighet av drivstoff (mangelen av hydrogenstasjoner) er den viktigste årsaken til at hydrogen havner på jumboplass. Biodiesel er logistikkmessig relativt enkelt å få til, men få aktører gjør at forsyningssikkerheten er relativt lav og tilgjengeligheten begrenset.



Figur 21: Resultater for parameteren Pålitelighet, der de mer umodne teknologiene (Hydrogen og Batterier) forventes å ha avere Driftssikkerhet en de etablerte per i dag. Alle de vurderte konseptene forventes imidlertid å kunne gi høy pålitelighet innen 2021.



Figur 22: Resultater for parameteren Ressurstilgang.



Figur 23: Resultater for parameteren Sikkerhet, der Risiko under drift er vektet 60 %.

Det er viktig å presisere at resultatene er et nåtidsbilde, og at spesielt underparameteren *Tilgjengelighet av drivstoff* vil kunne endre seg raskt så fremt aktørene beslutter seg for å fase inn et alternativt konsept. Tilgjengeligheten kan dessuten bli tilfredsstillende for flere av konseptene med begrensede investeringer, da det er tilstrekkelig med tilgang på drivstoff ved endestasjonene for den aktuelle banestrekningen.

I et lengre tidsperspektiv (mot 2050), vil vi forvente at tilgang på fossil-basert diesel som drivstoff vil avta, knyttet til politiske føringer (de-karbonisering av transport). Biodiesel og hydrogen vil kunne produseres distribuert i mindre skala og tilgjengeligheten forventes dermed å bli god, for biodiesel allerede innen 2021, og for hydrogen (avhengig av politiske incentiver) innen 2027.

1.5.7 Sikkerhet

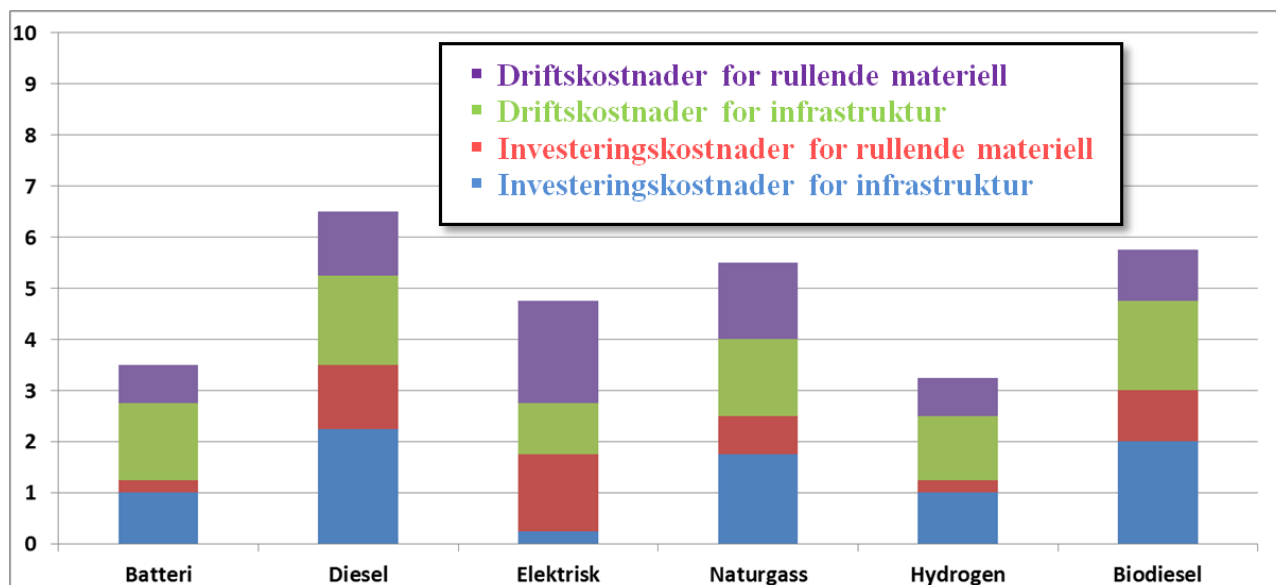
Sikkerhet er en parameter av høyeste betydning for valg av fremtidige løsninger for framdrift av tog. To underparametere er inkludert i denne grovanalysen; hhv Risiko under (normal) drift av toget og Risiko knyttet til anvendelse av drivstoff og vedlikehold av materiell og infrastruktur.

For denne parameteren er det viktig å påpeke at sikkerhetsnivå for dagens dieseltog er satt til 5 som referanse og for å ivareta resultater som både er høyere og lavere enn dagens nivå. Elektriske tog (med KL) vurderes å totalt sett ha noe lavere risiko under drift av toget enn dieseltog, da det ved en eventuell ulykke finnes et betydelig energimengde lagret i diesel-tankene, som potensielt kan antennes og gi store skader. En ulykke med et elektrisk tog under drift vil kunne ha de samme materielle skadene knyttet til den betydelig bevegelsesenergien som disse representerer, men man kan koble fra høyspenningen på linjen for elektriske tog og dermed redusere følgeskadene betraktelig.

Biodiesel forventes å ha samme sikkerhetsnivå som konvensjonell diesel, mens håndtering av naturgass anses å være forbundet med noe høyere risiko enn for de flytende diesel-drivstoffene, da det er snakk om trykksatt gass (200 eller 350 bar). Tilsvarende er kjennskap til og kunnskap om å håndtere hydrogengass som drivstoff lavere, og hydrogen har bredere eksplosjonsgrenser¹⁴ enn naturgass, og derfor scorer hydrogen noe lavere på Sikkerhet. Batteriteknologi vurderes å ha den høyeste risikoen og scorer lavere både under drift og for lading og vedlikehold av materiell. Årsaken ligger i at energien er lagret og energikonverteringen foregår i en og samme enhet (batteriet). De energirike materialene i batteriet vil antenne i kontakt med luft, og det er derfor fare for brann/eksplosjon hvis batteriet får fysisk skade grunnet ytre påvirkning. Det er også kritisk å kontrollere temperaturen i batteriet, da overoppheting under lading eller drift også vil kunne føre til brann/eksplosjon.

Sammenliknet med batteriet, er drivstoffet adskilt fra den energikonverterende enheten (brenselcellen) for Hydrogen-konseptet. Hvis det skjer en ulykke, kan tilførsel av drivstoffet stenges, slik at kun en meget begrenset

¹⁴Hydrogen er eksplosivt i blanding med luft fra 4 % til 75 % (volum), mens naturgass har snevrere grenser fra 5 % til 15 % (volum) [22].



Figur 24: Estimer for forventet Totalkostnad for de ulike konseptene, fordelt på investerings- og driftskostnader. Kostnader for batteri- og hydrogenkonseptene forventes å falle betydelig i årene som kommer.

energimengde (i form av hydrogen i brenselcellesystemet) utløses. Dette forutsetter naturligvis at sikkerhetssystemene fungerer. Alt i alt, er det betydelige variasjoner i forventet sikkerhetsnivå for de ulike konseptene pr dags dato, men robuste systemer for å redusere risiko både under drift og vedlikehold vil øke sikkerheten i årene som kommer.

1.5.8 Totalkostnad

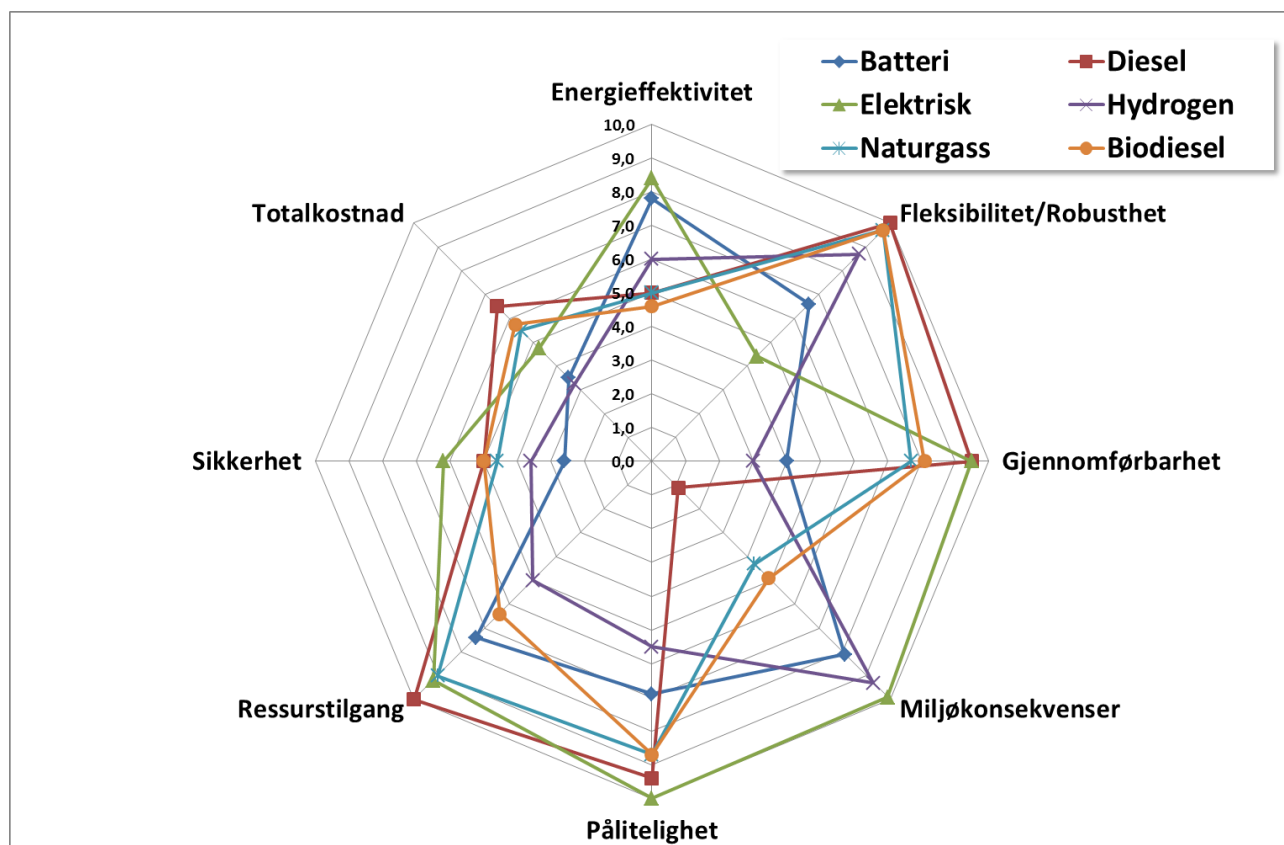
Totalkostnad er for ulike konsepter for framdrift av tog er knyttet til investeringskostnader i rullende materiell samt drift av dette, og investeringer i infrastruktur og driftskostnader knyttet til vedlikehold av denne. For jernbane-applikasjoner er det viktig å skille slik, da infrastruktur ivaretas av andre aktører og tilhørende kostnader dekkes over andre budsjetter enn tilsvarende for rullende materiell.

Det er viktig å presisere at hver av de fire underparameterne er gitt lik vektlegging (25 %) i denne analysen og at resultatene kun gir en relativ rangering av konseptene mht forventet total kostnad per dags dato.

Lagringstanker og dispensere for flytende drivstoff har lav kostnad og Diesel og biodiesel scorer derfor meget høyt på investeringer for infrastruktur. Tilsvarende for flytende naturgass er noe mer kostbart. Da markedet for større forbrenningsmotorer som kan konvertere biodiesel eller er tilpasset naturgass som drivstoff er under etablering og tilbudet fra produsenter er begrenset, scorer Biodiesel- og Naturgass-konseptene noe lavere enn fossil diesel på investeringskostnad for rullende materiell. Da vi verken har infrastruktur for Batteri- eller Hydrogen-konseptene (hhv lade- og hydrogenstasjoner) forventes disse å bli relativt kostbare.

Konvensjonell elektrifisering (med kontaktledning) er meget kostbart (ref. 2,8 Mrd NOK for Trønder- og Meråkerbanen). Rask utvikling av både Batteri- og Hydrogen-teknologi gjør at det forventes betydelige reduksjoner i investeringskostnader for begge disse konseptene de kommende årene.

Ren batterielektrisk drift forventes ikke å bli gjennomførbart ei heller konkurransedyktig, selv ikke i et 2027-perspektiv. **Men:** Del-elektrifisering peker seg ut som en interessant løsning som allerede innen 2021 forventes å få en total kostnad som ligger lavere enn elektrifisering. Kombinasjon med hydrogen for å øke rekkevidden utgjør også en løsning som allerede nå vinner terreng for flåtekjøretøyer (postbiler). Det anbefales derfor å vurdere del-elektrifisering og elektriske hybrid-løsninger inkludert hydrogen i fase II.



Figur 25: Sammenfatning av resultater for de 6 konseptene langs 8 akser (parametere).

1.6 Oppsummering, konklusjoner og anbefalinger for videre arbeid i fase II

1.6.1 Oppsummering og sammenstilling av resultater

Seks ulike konsepter for framdrift av tog er vurdert i denne Grovanalysen. De åtte parameterne som konseptene er vurdert opp mot, representerer alle sentrale fasetter i en totalvurdering som bør ligge til grunn for den videre satsing på jernbanen i Norge. Nåtidspildet i figur 25 og tabell 4 viser fordeler og ulemper ved de ulike fremdriftskonseptene mht. utvalgte parametere.

Tabell 4: Oppsummering av resultater fra evaluering foretatt i grovanalysen. Fargekoding: Dårlig, Bra, (*referanse)

Parameter	Batteri	Diesel	Elektrisk	Hydrogen	Naturgass	Biodiesel
Energieffektivitet	7,8	5,0	8,4	6,0	5,0	4,6
Fleksibilitet/Robusthet	6,6	10,0	4,4	8,7	9,7	9,7
Gjennomførbarhet	4,0	9,5	9,5	3,0	7,7	8,1
Miljøkonsekvenser	8,1	1,1	9,9	9,3	4,3	4,9
Pålitelighet	6,9	9,4	10,0	5,5	8,7	8,7
Ressurstilgang	7,4	10,0	9,2	5,0	9,0	6,4
Sikkerhet	2,6	5,0*	6,2	3,6	4,6	5,0
Totalkostnad	3,5	6,5	4,8	3,3	5,5	5,8

1.6.2 Anbefalinger for tolkning og bruk av resultatene

Det er viktig å påpeke at den grovanalysen som er foretatt er en kvalitativ ståstedsanalyse, der de ulike konseptene er vurdert i forhold til hverandre gitt dagens teknologiske modenhet. Resultatene vil i så måte gi en pekepinn på hvilke fordeler og ulemper de ulike konseptene har, men gir ikke eksakte tall for hvor mye bedre eller verre et konsept vil være sammenliknet med et annet.

I fase I er det framkommet noen svakheter/utfordringer mht. metoden som er benyttet:

- Da tilgjengelighet av teknologi og regelverk er absolutte krav for at et konsept skal kunne realiseres (ref. parameter Gjennomførbarhet), vil vektning mellom underparametere ikke være den beste måte å vurdere parameteren på. Hver underparameter bør håndteres som en bolsk variabel¹⁵ og vurderes opp mot de to andre underparametere som også er avgjørende for konseptets gjennomførbarhet.
- For parameteren Totalkostnad er alle de 4 underparametere vektet med 25 % hver. I en mulig framtidig kvantitativ evaluering, er det naturligvis mer hensiktsmessig å summere de reelle kostnadene for hver av underparametere og så rangere disse på en skala fra 1–10.

Håndtering av disse to parameterne bør i eventuelt videre arbeid foretas iht. indikasjonene over.

Det kan være fristende å summere et konsepts score for alle parameterne og sammenlikne summen med tilsvarende for andre konsepter. Dette gir imidlertid liten mening, og frarådes. Tolkning av resultatene avhenger videre av hvilken aktør man fokuserer på. Mens infrastruktur vil ha større betydning for Jernbaneverket, vil aspekter knyttet til rullende materiell være viktigere for NSB og CargoNet.

Den teknologiske utviklingen går meget raskt, spesielt innen batteriteknologi for personbiler, men også innen hybridisering av skip og tog. Massiv trykk for å fase inn naturgass i skip er også en trend vi forventer vil kunne få betydning for jernbanedrift. Tilsvarende teknologisk utvikling er på gang innen flere andre områder, derunder hydrogen og brenselceller.

1.6.3 Konklusjoner

Følgende hovedkonklusjon kan trekkes basert på grovanalysen som er foretatt i fase I av prosjektet:

Basert på de kvalitative vurderingene av alternative framdriftskonsepter for jernbanen, er SINTEF av den oppfatning at det ikke er hensiktsmessig å gjennomføre konvensjonell elektrifisering for resterende (ikke-elektrifiserte) jernbanestrekninger før alternativene til nullutslipp er utredet mer i detalj.

1.6.4 Anbefalinger for videre arbeid i fase II

Basert på resultater fra grovanalysen foretatt i fase I av prosjektet og sammenfattet i denne rapporten, anbefales det at følgende konsepter og aspekter som utredes nærmere i fase II:

- a) Alternative konsepters forventede teknologiutvikling i et 2021, 2027 og 2050-perspektiv. En nærmere gjennomgang av konseptene fra fase I mht. deres muligheter for implementering.
- b) Utredning av del-elektrifisering med fokus på utvalgt(e) jernbanestrekning(er). Tekniske muligheter og estimater for totalkostnader for del-elektrifisering (kombinasjon av elektriske tog med kontaktledning, batteri- og hydrogenteknologi).

¹⁵En bolsk variabel kan bare innta 2 verdier, som for eksempel “sann/usann”, “ja/nei” eller “0/1” som i databits

Fase IIa

Ulike konsepters aktualitet for implementering

Sammendrag

I det 21. århundre finnes det en rekke drivkrefter for implementering av alternative framdriftsteknologier og drivstoff. Den sterkeste er global oppvarming grunnet transportsektorens betydelige bidrag til utslipp av klimagasser.

Det er viktig å erkjenne at Norge og det norske jernbanenettet utgjør en meget beskjeden del av det Europeiske jernbanenettet, og at Norge og norske aktører i stor grad vil måtte følge utviklingen internasjonalt på området.

Basert på trender og drivkrefter er ulike fremdriftskonsepters og alternative drivstoffs aktualitet for implementering i det norske jernbanenettet vurdert iht. fem utvalgte faktorer:

- i) Miljøkrav,
- ii) Tilgjengelighet av teknologi,
- iii) Tilgjengelighet av regelverk,
- iv) Økonomi,
- v) Fleksibilitet/Robusthet.

Resultatene fra evalueringene, foretatt i denne del a) av fase II av prosjektet, er sammenfattet i tabell 5, hvor karakteren går fra 1 (dårligst) til 10 (best). For faktoren økonomi, er det valgt å benytte tall for Rørosbanen i sammenstillingen.

Tabell 5: Sammenstilling av resultater for valgte driftsformer fram mot 2050, høyt tall betyr bra.

Driftsform	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2030	2050
Diesel (-elektrisk)	6	5	5	5	5	4	4	4	4	3	2	2	1	1	1
Elektrisk (KL)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4
Del-elektrisk	3	3	4	5	5	6	7	8	8	8	7	7	7	7	7
Batteri	2	3	4	5	6	7	8	8	8	8	8	8	8	9	9
Biodiesel	2	4	5	6	6	6	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Naturgass	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4	2	1
Hydrogen	1	2	2	3	4	5	6	6	8	8	9	9	9	9	10

De mest aktuelle konsepter for implementering på ikke-elektrifiserte strekninger:

- For 2015 viser resultatene at den beste løsningen for ikke-elektrifiserte baner er å fortsette å benytte konvensjonelle Diesel-elektriske tog.
- I 2021 er Biodiesel, Del-elektrisk og Batteri-elektrisk framdrift de beste løsningene, men Naturgass og Hydrogen kan også bli aktuelle alternativer til elektrifisering med KL.
- I 2027 er Hydrogen- og Batteri-konseptene best egnet for implementering, mens Del-elektriske og Biodiesel også representerer akseptable løsninger.
- I år 2050 er nullutslippsløsningene de som utgjør de aktuelle driftsformer, da i form av Hydrogen, Batteri og Del-elektriske løsninger og kombinasjoner av disse. Biodiesel er også en akseptabel løsning, men lokale utslipp og lav virkningsgrad gir dårlig total energiutnyttelse for dette konseptet da forbrenningsmotor benyttes.

Transportsektoren er under endring med høyt fokus på klima- og miljøutfordringer. Vi er vitne til en meget rask teknologiutvikling innen hybridisering av drivlinjer og spesielt innen batteri- og hydrogenteknologi. SINTEF har avdekket at det allerede i dag finnes teknologiske løsninger som vil kunne eliminere utslippene fra jernbanetransport til en betydelig lavere kostnad enn konvensjonell elektrifisering med kontaktledning, gitt dagens trafikk på de vurderte jernbanestrekningene. Det forventes at flere nye, alternative løsninger for nullutslipp vil bli tilgjengelig for implementering i jernbanetransport mellom 2020 og 2030. SINTEF anbefaler derfor at nye, alternative løsninger for nullutslipp inkluderes når framtidig driftsform for gjenværende ikke-elektrifiserte strekninger skal utredes nærmere.

Ila.1 Bakgrunn, trender og drivkrefter

Med bakgrunn i fase I av prosjektet “*Alternative drivstoff for ikke-elektrifiserte baner*”, der SINTEF har vurdert utnyttelsen av andre energibærere enn diesel og alternativer til elektrifisering på ikke-elektrifiserte jernbanestrekninger i Norge for Jernbaneverket, er denne fase II definert.

Fase II inneholder 2 hoveddeler:

- i) **Alternative konsepters aktualitet for implementering i det norske jernbanenettet i 2021, 2027 og 2050** En nærmere gjennomgang av konseptene fra fase I mht. forventet teknologi- og kostnadsutvikling, innskjerping av miljøkrav samt tilgjengelighet av teknologi og regelverk
- ii) **Utredning av del-elektrifisering med fokus på utvalgte jernbanestrekninger** Tekniske muligheter og estimater for total kostnader for del-elektrifisering (kombinasjon av kontaktledning/batteri/hydrogen).

Trenden mot elektriske drivlinjer innen transport er motivert av økt effektivitet. Vi ser det spesielt tydelig i personbilssegmentet, der en stadig økende andel av nybilsalget er batterielektriske eller hybrider¹⁶. Bussprodusenter har i økende omfang de siste årene lansert hybridversjoner, som er spesielt egnet for bynære strøk, der hyppig start og stopp gjør at elektriske systemer med regenerativ bremsing gir betydelige reduksjoner i drivstofforbruk. Også innen tungtransport på vei, er elektriske drivlinjer på vei inn.

Da man i løpet av to tiår så hvordan diesel erstattet damplokomotivene mellom 1940 og 1960, var den primære drivkraften at diesel ga betydelige driftsmessige fordeler.

I det 21. århundre finnes det en rekke drivkrefter for implementering av alternative framdriftsteknologier og drivstoff. Den sterkeste er global oppvarming grunnet transportsektorens betydelige bidrag til utslipp av klimagasser. Dette har ført til at det er en omforent oppfatning om at den forestående revolusjonen innen transportsektoren vil bli gjennomgripende og vil kunne komme til å skje raskere enn tilsvarende tidligere prosesser.

Ila.2 Norges rolle i en internasjonal kontekst

Det er viktig å erkjenne at Norge og det norske jernbanenettet utgjør en meget beskjeden del av det Europeiske jernbanenettet, og at Norge og norske aktører i stor grad vil måtte følge krav og føringer internasjonalt på området. Det vil derfor i liten grad legges premisser i Norge for utviklingen som finner sted, hverken innen rullende materiell eller infrastruktur.

Norges engasjement i det europeiske TEN-T-nettverket kan sammenfattes som følger [23]:

Norge har deltatt i TEN-T siden midten av 90-tallet, og har implementert de aktuelle rettsaktene fortløpende. Kravene til standard på infrastrukturen som inngår i Norge har i stor grad vært samsvarende med krav som også følger av andre internasjonale avtaler og konvensjoner Norge er part i. De finansielle instrumentene som brukes for å utvikle elementene i TEN-T inngår ikke i EØS-avtalen. Vi har dermed ikke hatt økonomiske interesser eller særlige praktiske hensyn å ivareta når

¹⁶I 2014 utgjorde batterielektriske personbiler 13 %, mens hybrider sto for 8 % av nybilsalget i Norge. Ladbare hybrider utgjorde rundt 1 % av nybilsalget samme år.

det gjelder utviklingen av dette nettet, og følgelig har det heller ikke fått særlig mye oppmerksomhet nasjonalt. Utviklingen av TEN-T i våre naboland og Norden er derimot av stor betydning for norsk næringslivs tilgang til det europeiske markedet. En omforent nordisk-baltisk tilnærming til utviklingen av sentrale transportårer er dermed viktig og Norge har derfor deltatt aktivt i et arbeid med de øvrige NB8-landene (de nordiske og de baltiske) i utforming av felles innspill til Kommisjonens arbeid med de reviderte retningslinjene. På bakgrunn av dette mener Samferdselsdepartementet det vil være i norsk interesse å også innta de reviderte retningslinjene i EØS-avtalen.

For jernbanen er det vurdert at det ikke er behov for tilpasninger—der utbygginger eller endringer ikke er samfunnsøkonomisk lønnsomme kan kravet om oppgradering fravikes.

Det norske jernbanenettet skiller seg fra det Europeiske på en rekke områder, ikke minst teknisk. Norge har f.eks. kun én strekning som regnes med innen kategorien høyhastighetstog (Flytoget fra Oslo til Gardermoen). Lav befolkningstetthet, lange distanser mellom større byer, høy andel enkeltsporede strekninger og kupert terreng er også faktorer som gjør Norge atypisk i en internasjonal kontekst.

De føringer som legges i Europa vil spesielt gjennom direktiver påvirke rammebetingelsene for jernbanen i Norge. Gjennom en ambisiøs klimapolitikk vil imidlertid norske aktører kunne være blant de første som tar i bruk ny teknologi. Krevende nordisk klima kan derimot utgjøre en barriere for de teknologier som fremdeles er på utviklingsstadiet.

Norge kan velge å innta en pionerrolle for implementering av ny teknologi, og dette vil kunne skje f.eks. i nært samarbeid med internasjonalt ledende leverandører av rullende materiell og aktører innen produksjon og salg av alternative drivstoff. Krevende nordisk klima vil også kunne være et argument for å få leverandører til å teste ut nye konsepter i Norge. Det er naturligvis en viss risiko ved å engasjere seg innen slike aktiviteter, da de kan resultere i redusert punktlighet.

Nye nullutslippsteknologier som kan innføres på norske ikke-elektrifiserte jernbaner blir ikke nødvendigvis særnorske løsninger. Kun 25 % av verdens jernbaner er elektrifisert, og halvparten av verdens jernbanetransport foregår på ikke-elektrifiserte strekninger. Selv om Sovjetunionen investerte mye i elektrifisering (hele den transsibiriske jernbanen ble elektrifisert på over 70 år), er halvparten av det russiske jernbanenettet fortsatt ikke elektrifisert. Canada opererer nesten ingen elektrifiserte jernbaner (mindre enn 0,3 %), i et 50 000 km langt jernbanenett, og fokuserer sterkt på godstransport. USA har også nesten ingen elektrifiserte jernbaner, men unntak av Northeast Corridor og deler av Keystone Corridor i New England. Det finnes altså et stort marked i verden for nye løsninger innen godstransport på ikke elektrifiserte baner.

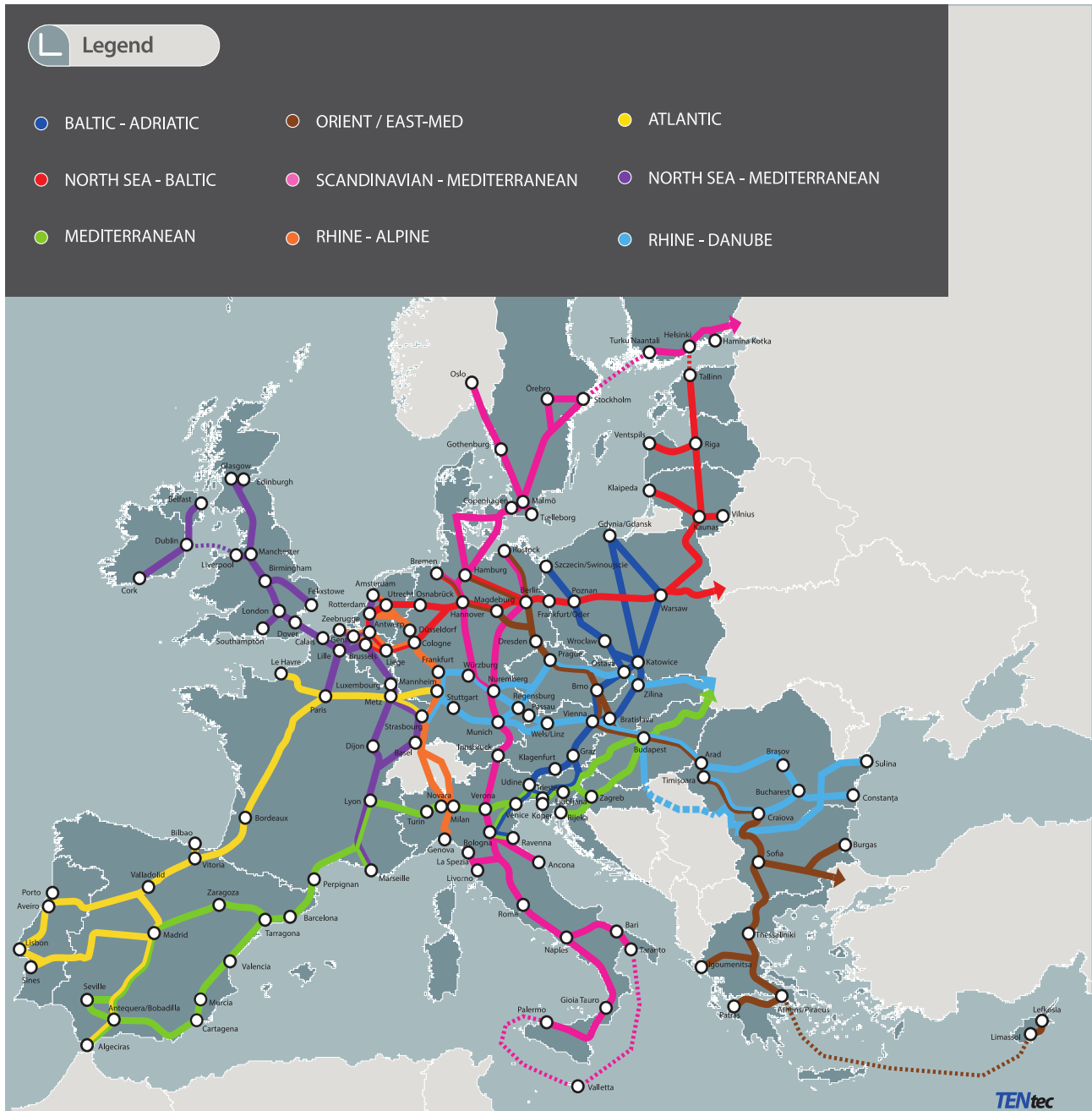
For persontransport, er det mange mindre regionale ikke-elektrifiserte strekninger i Europa som kan måle seg med norske kapasitetsbehov, for eksempel på Sardinia eller i trekanten mellom Magdeburg, Harz-fjellene og Halle i Tyskland.

Ila.3 Utfordringen og jernbanens bidrag til utslippsreduksjoner

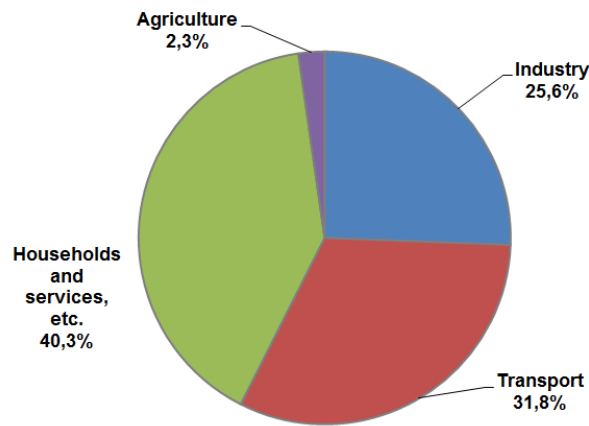
Grovt sett har man følgende tre måter å angripe miljø- og klimautfordringen på:

- a) Effektivisering av drivlinjene for å redusere energi/drivstoffbruket, derunder hybridisering
- b) Elektrifisering av banestrekninger der man i dag benytter diesel,
- c) Innfasing av alternative drivstoff basert på ikke-fossile energikilder

En rekke nye, mer effektive fremdriftsteknologier og alternative drivstoff er nå tilgjengelige. Disse er beskrevet i fase I av denne rapporten. Klimapolitiske virkemidler og industriens engasjement vil være viktige drivkrefter i overgangen til lav- og nullutslippsløsninger, og disse er beskrevet i påfølgende avsnitt.



Figur 26: Det europeiske jernbanenettet TEN-T [24].



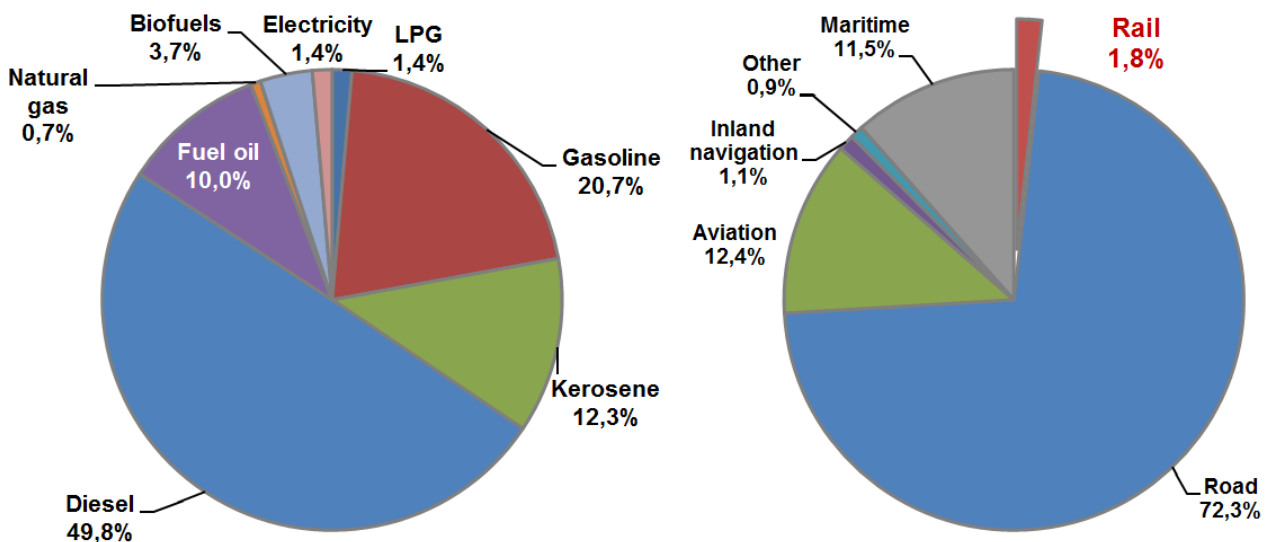
Figur 27: Energiforbruk per sektor (EU28, EUs 28 medlemsland.) [26].

Ila.3.1 Drivkrefter globalt, i Europa og nasjonalt

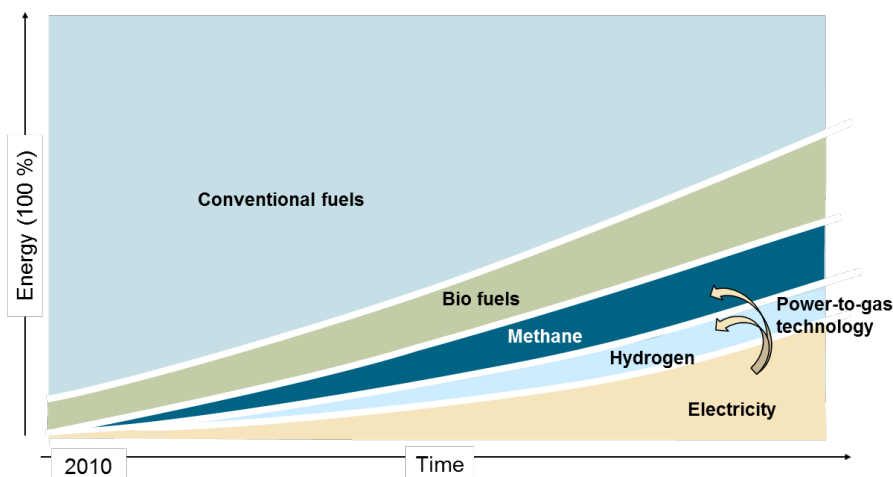
Miljøkrav for transport ble initiert av Clean Air Act i California i 1990, og var opprinnelig fokusert på lokal forurensning i storbyer som Los Angeles, og ble rettet mot nye personbiler. Som et ledd i arbeidet for å redusere luftforurensningen ble det innført restriksjoner for dieseldrevne lastebiler i California. Mot slutten av 1990-tallet økte fokuset på global oppvarming og har siden i betydelig grad dominert den internasjonale energi- og klimadebatten.

I 2011 var det globale energiforbruket i transportsektoren 29 156 TWh [25] og det totale CO₂-utslippet omlag 7 milliarder tonn. Transportsektoren står dermed for omtrent 28 % av energiforbruket og 22 % av det globale CO₂-utslippet. I EU utgjorde transport 32 % av energiforbruket i 2012 [26], hvilket kun overgås av forbruket i husholdninger (40,3 %), som vist i figur 27.

Når vi ser på EUs totale energibehov til transport, er det vegtransporten som langt overgår de andre segmentene (72,3 % av totalen som vist i figur 4 th). Jernbanetransport utgjør kun 1,8 %, hvorav igjen 60 % benyttes til elektrisk framdrift [26].



Figur 28: Drivstofforbruk fordelt på ulike drivstoff i Europa (til venstre) og forbruk i ulike transportsegmenter (til høyre), der jernbanetransport kun benytter 1,8 %.



Figur 29: Veikart for fremtidig erstatning av konvensjonelle med alternative drivstoff [28].

Import av fossile energikilder til Europa er en formidabel utgiftspost¹⁷ som har ført til sterkt politisk engasjement for å fase inn alternative drivstoff i alle transportsegmenter. Et rammeverk for å ta i bruk alternative drivstoff er under utvikling for å redusere avhengigheten av oljeimport og motvirke de negative miljøkonsekvensene fossilbasert transport har.

Et annet viktig faktor som vil virke inn på politiske føringer er de ulike transportsegmentenes andel oljebaserte drivstoff. Nær alle drivstoff benyttet i sjøtransport er petroleumsbaserte. For veg er andelen basert på oljeprodukter 94 %, mens den fossilbaserte energibruken i jernbanedrift er 40 %.

Den europeiske arbeidsgruppen for energi og miljø i NGVA [28] har gjort seg følgende refleksjoner rundt bruk av alternative drivstoff fram mot 2050:

For luftfart, som er aller mest avhengig av olje, er biomasse ansett å bli hovedalternativet. For veg- og sjøtransport finnes det flere egnede alternativer så som flytende naturgass (LNG), GTL¹⁸, biomasse og fornybare kilder som sol og vind som via elektrisitet omdannes til hydrogen. Kjernekraft kan også benyttes som kilde emphitil hydrogen.

I det lange løp må drivstoff produseres fra ikke-fossile kilder for å sikre reduksjon i klimagasser.

For internasjonal sjøtransport, er det flytende naturgass per dags dato den eneste løsningen, og selv her finnes det barrierer som må overkommes. For kystnær sjøtransport er det også potensial for hybridisering og elektrifisering.

For vegtransport kan alle alternative drivstoff benyttes i ulike kjøretøyer, både i forbrenningsmotorer, i hybride drivlinjer i kombinasjon mellom forbrenningsmotorer og elektriske motorer, i brenselceller og i rene batteri-elektriske fremdriftssystemer.

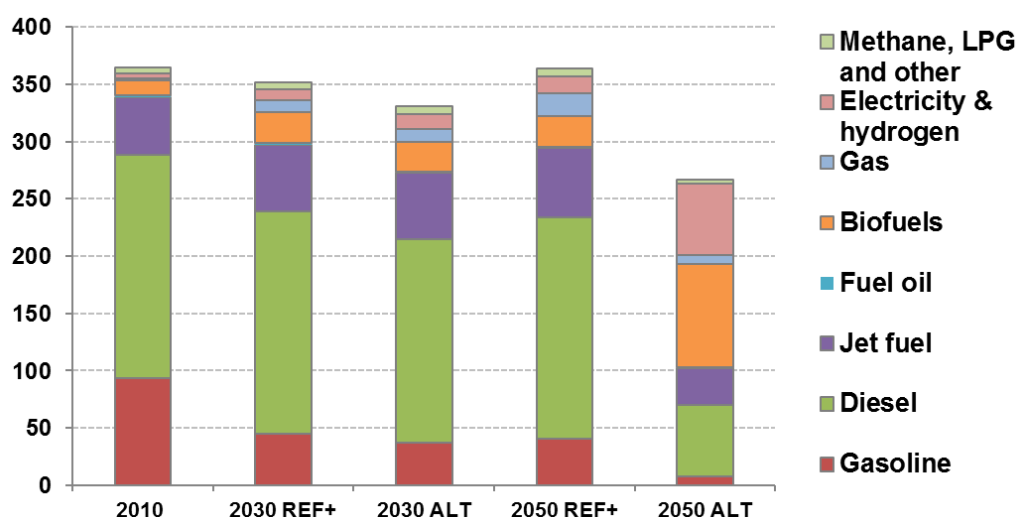
For jernbanedrift anses de primære alternative løsningene å bli elektrisitet og basert på biomasse.

Nordens utslippsbilde er ganske likt Europas, med et totalt energiforbruk i transportsektoren på 322,5 TWh i 2010 av totalt 1177 TWh, eller omtrent 27 %, men hele 36 % av CO₂-utslippet [30]. Norge skiller seg ut med spesielt lave CO₂-utslipp fra stasjonær energiforsyning (3 %), betydelige utslipp knyttet til olje- og gassutvinning (26 %) og høy andel av utslipp fra transport (33 %), alle tall for 2012.

Innenlands utslipp fra transport utgjorde 17,2 mill. tonn CO₂-ekvivalenter i 2013, hvorav veitransport bidro med 10,1 mill. tonn (59 %), sjø- og lufttransport tilsammen med 7.1 mill. tonn (41 %). Utslipp fra utenriks sjø-

¹⁷Europa importerte fossile energikilder for 1 mrd Euro hver dag i 2011 [27].

¹⁸Gas to Liquids, samlebegrep for prosesser for produksjon av flytende drivstoff med utgangspunkt i gassformige hydrokarboner. Eksempler er Naturgass til metanol, naturgass til diesel (Fischer Tropsch-syntese) etc.



Figur 30: Energibruk i MegaTonn Olje-Ekvivalenter (MTOE) til landtransport gitt dagens trender og etablert politikk (REF+) og under scenariet om å oppnå 60 % reduksjon (ALT) i klimagassutslipp innen 2050, EU28 [29].

og luftfart¹⁹ var hhv. 9,1 og 2,1 millioner tonn CO₂-ekvivalenter i 2012. Utslippene i transportsektoren har økt med rundt 30 % fra 1990 til 2012, og det er kun utslipp fra olje- og gassutvinning som har økt mer i samme periode. Jernbanedrift bidro med rundt 50 000 tonn CO₂-ekvivalenter i 2012 (se figur 31).

Miljøkrav har fra politisk hold vært fokusert på personbilsegmentet i flere tiår, mens maritim transport og utslipp fra togtransport har vært underlagt mindre strenge regler. Likevel har organisasjoner som International Maritime Organization (IMO), International Union of Railways (UIC) og the Community of European Railway and Infrastructure Companies (CER) engasjert seg betydelig innen miljø. De to sistnevnte organisasjonene forpliktet seg i 2008 “to reduce by 2020 the exhaust emissions resulted from the railway traction by 30 % at the level of the entire railway transport sector” og utslippene følges nøye fra år til år. I 2013 lanserte de studien “Moving towards Sustainable Mobility: European Rail Sector Strategy 2030 and beyond” [32].

Ila.3.2 Politisk engasjement i Europa og Norge

Det miljømessige fotavtrykket av transport globalt er meget stort, som omtalt i avsnitt Ila.3.1.

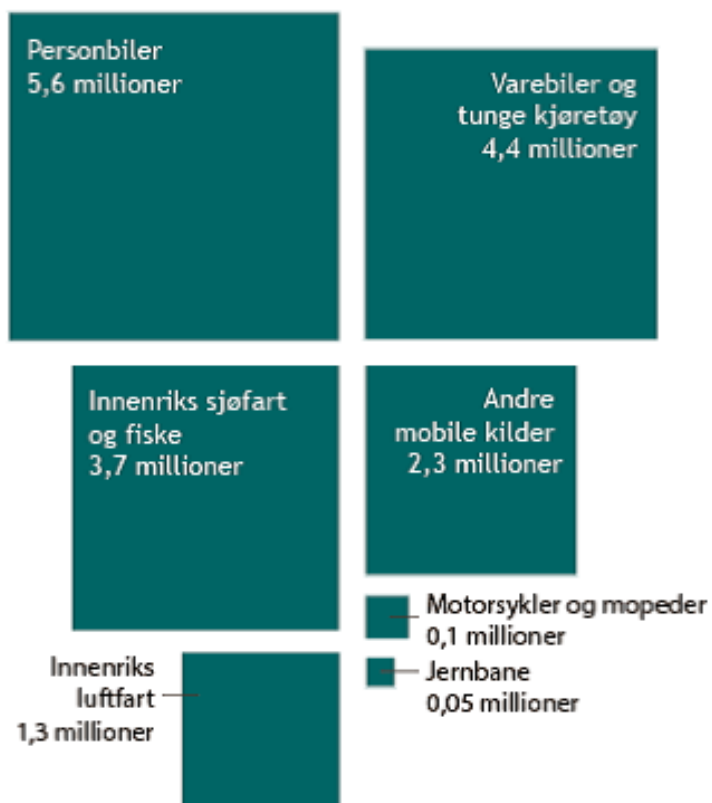
Ila.3.2.1 Direktiver og utslippskrav i Europa

Det er bred politisk enighet i Europa om at transportsektoren må realisere betydelige utslippskutt fram mot 2050. Ekspertgruppen for alternative drivstoff i Europa ser for seg implementering av naturgass, elektrisitet (batterier), biodrivstoff og hydrogen (figur 32):

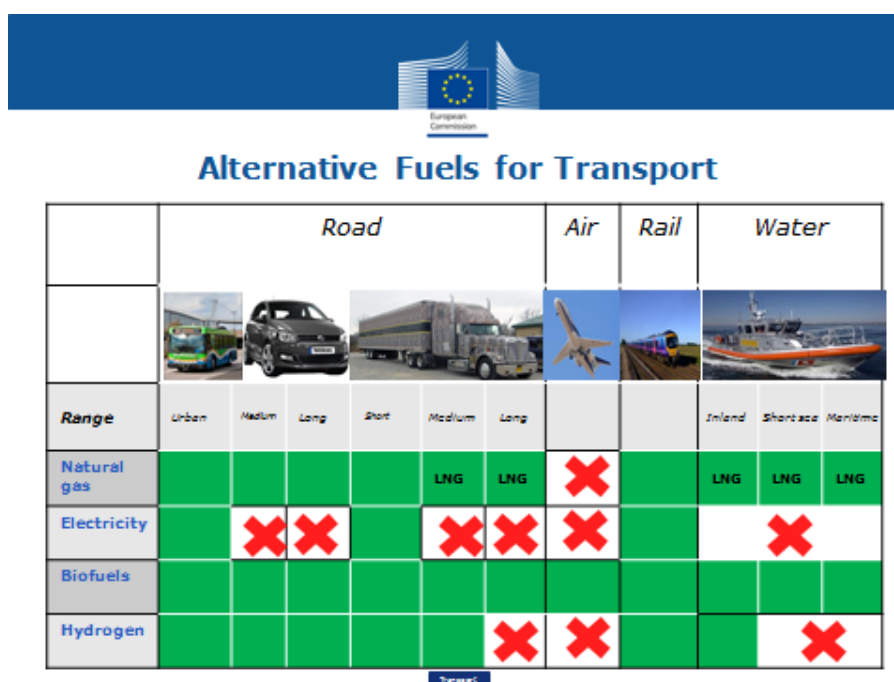
EU-kommisjonen etablerte i mars 2011 den såkalte “Transport 2050 roadmap” [34] som setter ulike målsetninger for ulike reisetypene innen byer, mellom byer og for langdistanse (se vedlegg C). Prosessen startet med at Kommisjonen lanserte Clean Fuel Strategy og har kulminert i adopsjon av Clean Fuel for Transport direktivet. Målsettingen er nedfelt i EU kommisjonens White Paper fra 20117, og sier at man i Europa innen 2050 skal:

- Være fri for konvensjonelle biler med fossilbaserte drivstoff i byer
- Oppnå 40 % bruk av bærekraftige (lav-karbon) drivstoff innen luftfart og minst 40 % reduksjon i utslipp fra maritim transport
- Flytte 50 % av mellomdistanse passasjer- og godstransport fra veg til jernbane og sjø

¹⁹Utenriks sjøfart omfatter her skip driftet av norskregistrerte rederier, uavhengig av skipenes eierskap eller flaggstat, og luftfart omfatter norske flyselskaper [31]

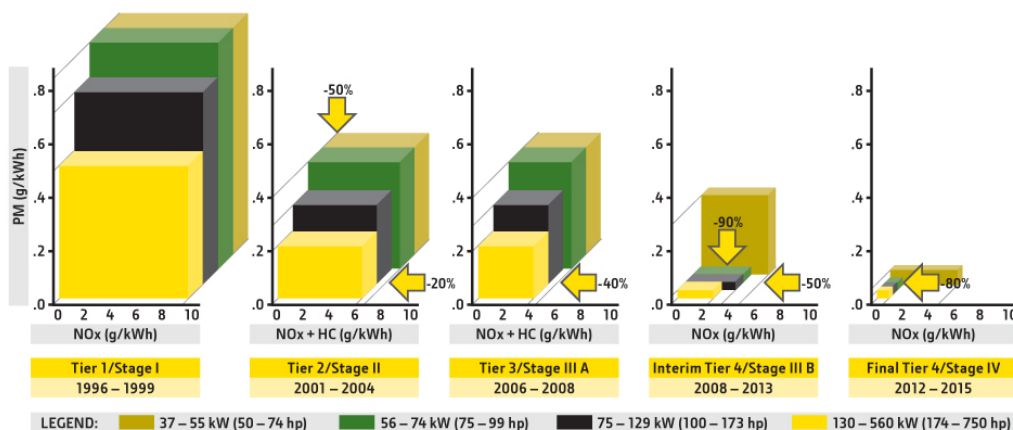


Figur 31: Utslipp til transport i Norge i 2012 (Miljødirektoratet).



Figur 32: EU-kommisjonenes syn på hvor ulike alternative drivstoff forventes å kunne få innpass [33].

EPA and EU nonroad emissions regulations: 37 – 560 kW (50 – 750 hp)



Figur 33: Figuren viser innskjerpingen i utslippskrav for “non-road applications” opp til 560 kW [35], derunder motorvognsett fra 1996 til 2015 for ulike effektklasser (opptil 560 kW).

Tabell 6: Forslag til innskjerping av utslippskrav som vil gjelde for alle effektklasser, derunder også større lokomotiver for godstog. Kravene forventes å bli satt i kraft fra 2021 [10].

Kategori	Nettoeffekt kW	Dato	CO	HC g/kWh	NO _x g/kWh	PM	PN 1/kWh
RLL-v/c-1 (Lokomotiver)	P > 0	2021	3,50	4,00	0,025	–	
RLR-v/c-1 (Vogner)	P > 0	2021	3,50	0,19	2,00	0,015	1 · 10 ¹²

for derigjennom å bidra til 60 % reduksjon i utslipp fra transport innen 2050.

Dieseltog har siden 1950-tallet vært det dominerende konseptet på ikke-elektrifiserte baner. Diesel-elektriske tog (som er referanse-teknologi i dette prosjektet) er de senere årene blitt underlagt krav for lokale utslipp, som omfatter NO_x, NO₂, SO₂, partikler (PM₁₀). EU innførte i 2012 krav til utslipp fra tog under utslippsstandarden Stage IIIB [10], som er en betydelig innskjerping i forhold til Stage IIIA-kravene for uforbrente hydrokarboner (HC) og Nitrogenoksid (NO_x). Standarden Stage IV trådte i kraft i 2014, men denne gjelder ikke trekraft for tog. Stage III og IV gjelder kun nytt rullende materiell. De foreslåtte Stage V-kravene skal gjelde lokomotiver og motorvogner uavhengig av ytelse (effekt) og skal etter planen innføres i 2021.

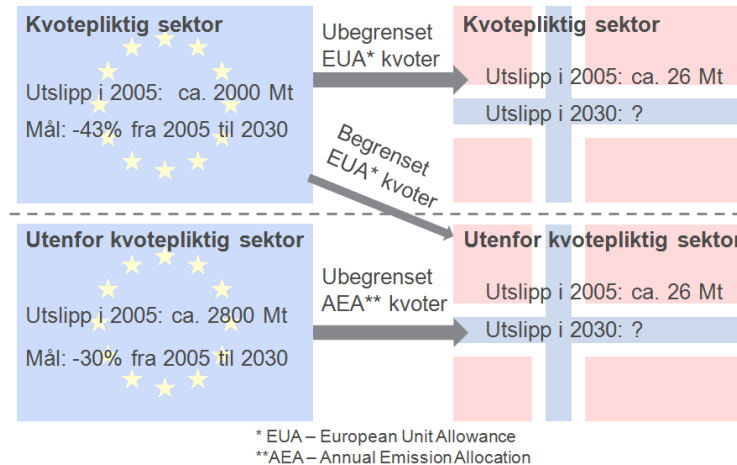
Det har siden midten av 1990-tallet vært restriksjoner på utslipp også for såkalte non-road-applications, som vist i figur 33.

Et forslag til ytterligere innskjerping av utslippskrav er vist tabell 6.

Ila.3.2.2 Norges forpliktelser og ambisjoner om utslippsreduksjoner

Frem mot 2030 legger Regjeringen opp til at Norge knytter sine utslippsforpliktelser nærmere til EU [36]. EUs mål for 2030 i er å kutte klimagassutslippene med 40 % sammenliknet med et 1990-nivå. Utslippene kan grovt sett deles i de som er omfattet av kvoteplikt og de som ikke er det. Ikke-kvotepliktig sektor omfatter samferdsel, oppvarming, jordbruk og avfall [37], der samferdsel desidert er den største bidragsyteren. Norge har vært en integrert del av EUs kvotehandelssystem [38] siden 2005 [36] og det er dermed klart at vi fortsetter å følge innstramningene for de områder som er omfattet av kvoteplikt mot 2030 på 43 prosent sammenliknet med et 1990-nivå.

Det er imidlertid ikke gitt hva Norges bidrag skal være i ikke-kvotepliktig sektor, som samferdsel er en del av; EU skal kutte utslippene med 30 % i ikke-kvotepliktig sektor for unionen som helhet, med referanseår 2005 (se



Figur 34: Skisse som viser hvordan utslipp innenfor og utenfor kvotepliktige sektorer vil bli regulert [37].

figur 34). Det mest sannsynlige er at byrdefordelingen (basert på bruttonasjonalprodukt) som gjelder innad i EU også vil gjelde Norge. Dette betyr at vi får et krav om 40 % kutt nasjonalt. Noen av disse kuttene kan imidlertid gjennomføres ved kjøp av kvoter i EUs kvotesystem (én gang i perioden før 2020) og/eller ved gjennomføring av klimatiltak i andre EU-land. Både fordi det er vanskelig å vite hvor kostbart det vil bli å benytte seg av de fleksible mekanismene og fordi det generelt er vanskelig å anslå hvor store forbedringer vi får i teknologi, er det svært vanskelig å si noe absolutt i dag om hvor krevende det blir å oppfylle EUs mål frem mot 2030.

I tiden etter 2030 er det et uttalt mål både i EU og Norge at vi skal fortsette å legge opp til utslippskutt i samsvar med IPCCs 2-gradersbane [36], noe som innebærer at landene må redusere utslippene i størrelsesorden 50–80 % sammenliknet med et 1990-nivå i 2050.

Stortinget har dessuten nylig vedtatt at Regjeringen skal sørge for at kollektivtrafikken i 2025 som hovedregel benytter null- eller lavutslippsteknologi eller klimanøytralt drivstoff. Dette vil også omfatte jernbanedriften.

I Norge er miljømålene i gjeldende Nasjonal transportplan (NTP) 2014–2023 som følger:

“Transportsektoren skal bidra til å redusere klimagassutslippene i tråd med Norges klimamål slik de er redegjort for i klimameldingen (Meld. St. 21 Norsk klimapolitikk) og i klimaforliket (Innst. 390 S 2011-2012), herunder bidra til at Norge omstilles til et lavutslippssamfunn.”

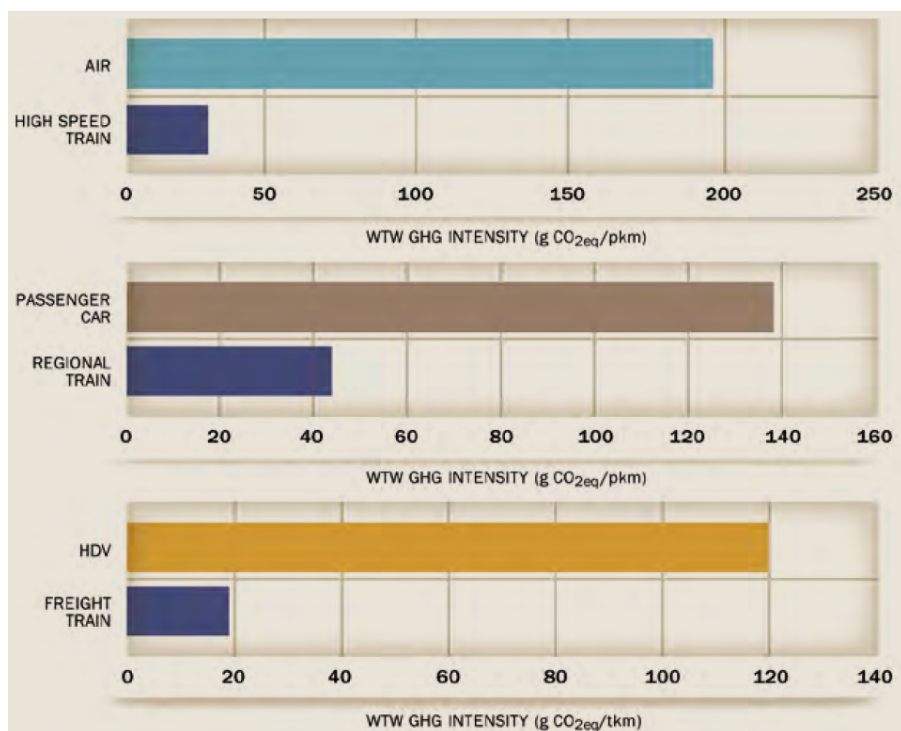
Jernbanens bidrag i utslipp er relativt lave²⁰ og kommer i hovedsak fra diesellokomotiver. Vare- og gods-transporten forventes å øke med 40 % fram mot 2030 og det er i tråd med Regjeringens strategi og gjeldende NTP å få mer gods fra veg til bane og sjø. En slik overføring er et viktig klimatiltak i seg selv, uavhengig av om strekningen er elektrifisert eller ikke, da jernbane er en langt mer energieffektiv transportform enn de løsninger som i dag benyttes både for vegtransport og i luftfart (se figur 35). Dette er spesielt viktig for å redusere klimagassutslippene knyttet til godstransport. Økt andel godstransport på bane gir i så måte langt større klimagasseffekt enn investeringer rettet mot persontransport på bane.

I gjeldende NTP skrives det videre:

“Overgang fra diesel til elektrisk togframføring sees som viktig både for å utvikle mer fleksible og effektive togprodukter, med mulighet for nye (gjennomgående) rutetilbud, redusert reisetid pga. raskere akselerasjon, betydning for godstransport spesielt pga. økt trekkraft og som et bidrag til å redusere miljøulempene ved godstransporten generelt.”

Jernbaneverkets overordnede miljømål er til enhver tid gitt av etappemålene for miljø i gjeldende NTP. Teknologiutviklingen for transportmidler går ikke raskt nok i forhold til klimamålene. I inneværende NTP understrekes viktigheten av å overføre godstransport til mer miljøvennlige alternativer og å elektrifisere der det er kostnadseffektivt (jfr. figur 35).

²⁰Cirka 50 000 tonn CO₂-ekvivalenter/år, se figur 31



Figur 35: Jernbanens fotavtrykk i form av klimagassutslipp sammenliknet med veg- og lufttransport. Tallene er for Europa, der 40 % av energibruken til jernbanen er dekket av diesel [39]. HDV står for “Heavy-Duty Vehicle” (lastebil eller vogntog).

Forutsetning i denne analysen er altså at, gitt de ambisiøse overordnede miljømålene, forutsettes det at Jernbaneverket ved innføring av ny teknologi må legge til grunn **nullutslipp**.

SINTEF tolker dette dithen at fokus for arbeidet i prosjektet “Alternative drivstoff for ikke-elektrifiserte baner” legges på alternative framdriftskonsepter som går i retning av nullutslipp, derunder batteri- og hydrogenteknologi. Alternativer som ikke gir nullutslipp (så som naturgass og biodiesel) vies tilsvarende mindre oppmerksomhet.

Ila.3.3 Industriens engasjement og utvikling av hybride drivlinjer

Gjennom det offentlig-privateide foretaket “Shift to Rail Joint Undertaking” har EU-kommisjonen lagt til rette for en storsatsing for at jernbanen skal ta en større andel av person- og godstransporten, og dermed bidra til utslippsreduksjoner i Europa. Satsingen har fokus på forskning og innovasjon.

Ila.3.3.1 Diesel-hybridtog

Hybrid-løsninger for lokomotiver reduserer dieselforbruket, spesielt for passasjertog med hyppige stopp. Allerede fra midten av 1980-tallet demonstrerte den Tsjekkoslovakiske produsenten ČKD et dieselhybrid-lokomotiv. Toget var i drift i 10 år, men mangel på batteriproduksjonskapasitet i større skala hindret videre utbredelse. Det første Japan Rail Gods Class HD300 shuntlokomotiv med hybriddrift ble levert av Toshiba i 2010 [40] (se figur 36). Lokomotivet benytter Li-ion-batterier og reduserer utslippene med mellom 30 % og 40 % og støy med minst 10 % sammenliknet med de til da benyttede Class DE10 diesellokomotivene. Dieselhybrider er også utviklet og tatt i bruk i Polen, Russland Storbritannia, Nord-Amerika.



Figur 36: Japan Rail (JR) Freight's diesehybrid benytter Li-ion-basert batteriteknologi (til venstre). Denne, samt JR-persontog også som diesehybrid, ble satt i drift i 2010 og nytt materiell i 2015 (til høyre).

Ila.3.3.2 Hydrogen/batterihybrid

I mer enn 10 år har Japan Rail East operert en test-motorvogn (New Energy Train) som fra starten i 2003 ble drevet av en diesehybrid. I 2006 ble forbrenningsmotoren og diesel byttet ut med brenselceller og hydrogen. Dette var verdens første hydrogen/batterihybrid. Fra 2009 ble motorvognsettet utstyrt med Li-ion-batterier og pantograf. Hybrid-toget har en toppfart på 100 km, og den rene batteri-elektriske løsningen en rekkevidde på 50 km.

Ila.3.3.3 Batteri og brenselcelledrift

Det første rene batteri-elektriske passasjeretog ble satt i prøvedrift i Storbritannia i januar 2015 [41]. Selskapet Alstom har nylig (i samarbeid med 3 regioner og transportmyndigheter) besluttet å sette i prøvedrift to hydrogendrevne brenselcelletog i Tyskland innen 2018, og har ambisjon om at 40 slike togsett skal være i kommersiell drift i 2020 [42].

Ila.4 Tilnærming til problemstillingen og valg av metode

Grovanalysen som ble utført i fase I av prosjektet (beskrevet i fase I av denne rapporten) var en kvalitativ ståstedsanalyse (for år 2014) av seks framdriftskonsepter. Konseptene ble evaluert iht. 8 hovedparametere og til sammen 22 underparametere. Denne øvelsen var i seg selv omfattende, da man måtte evaluere og angi 132 scores



Figur 37: Et rent batterielektrisk passasjeretog ble satt i prøvedrift i Storbritannia i januar 2015 (til venstre). Alstom har inngått et samarbeid med 3 tyske regioner og skal teste 2 hydrogentog fra 2018 (til høyre).

Tabell 7: Oversikt over hvordan parameterne benyttet i fase I er ivaretatt av faktorer i fase II.

Parametere benyttet i fase I (Grovanalyse av alternative konsepter)	Faktorer for evaluering av aktualitet (fase II) (implementering i 2021, 2027 og 2050)
Miljøkonsekvenser	Miljøkrav
Gjennomførbarhet	Tilgjengelighet av teknologi
Fleksibilitet/Robusthet Pålitelighet Ressurstilgang	Fleksibilitet/Robusthet
Sikkerhet	Tilgjengelighet av regelverk
Energieffektivitet Totalkostnad	Økonomi (inkl. effektivitet)

(22 underparametere × 6 konsepter) og deres innbyrdes relative verdier måtte avstemmes mellom konseptene for å sikre robuste, kvalitative konklusjoner for alle parametere.

Det ble vurdert og funnet for omfattende å foreta en tilsvarende vurdering i fase II som den som ble foretatt i fase I av prosjektet. Dette fordi det i denne del a) av fase II er lagt fokus på de ulike konseptenes aktualitet for implementering i et langt tidsperspektiv fram mot 2050. Usikkerheten er dermed større, og problemstillingen angripes derfor bedre ved å vurdere (mega)trender innen transportsektoren, så som miljøpolitiske føringer og direktiver, tilgjengelighet av teknologi og regelverk samt forventet teknologi- og kostnadsutvikling for de ulike alternative konseptene.

Ila.4.1 Valg av faktorer for evaluering av aktualitet

Basert på de trender som er omtalt i avsnitt Ila.3, kan drivkrefter for implementering av alternative framdriftsteknologier og drivstoff oppsummeres og beskrives av de 5 faktorene oppført i høyre kolonne i tabell 7.

Evaluering av konseptene mht. disse 5 faktorene fram mot 2050 er omtalt i påfølgende avsnitt. De 5 faktorene som legges til grunn i fase II ivaretar de 8 Parameterne som ble benyttet i fase I av prosjektet, som vist i tabell 7.

Det er imidlertid viktig å påpeke at det ikke er direkte samsvar mellom parameterne benyttet i grovanalysen of faktorene som brukes i evalueringen foretatt i fase Ila. Som eksempel vil et konsept som i grovanalysen er vurdert å gi betydelige negative miljøkonsekvenser (i form av lokale eller globale utslipp og dermed er gitt moderat score) kunne innfri alle gjeldende miljøkrav og dermed oppnå full score i fase Ila. Likeledes vil et konsept som i grovanalysen er vurdert til å kunne gi akseptabel sikkerhet bli gitt lav score i fase II fordi det mangler regelverk på området. Parametere og faktorer har derfor betydelig ulik valør og kan ikke sammenliknes direkte. Mens grovanalysen er en ståstedanalyse (2014) der konseptene er vurdert i henhold til sine kvalitative kjennetegn, er fase Ila fokusert på absolutte kriterier for implementering av konseptene i jernbanedrift og tar bl.a. hensyn til forventninger til innskjerping i miljøkrav samt teknologi- og regelverksutvikling fram mot 2050. Parametere og faktorer er definert henholdsvis i avsnitt I.3 og Ila.5.

I fase I benyttet vi følgende 4 underparametere innen økonomi:

- Driftskostnader, rullende materiell
- Driftskostnader, infrastruktur
- Investeringskostnader, rullende materiell
- Investeringskostnader, infrastruktur

Tabell 8: Eksempel på bruk av score mellom 1 og 10 for å angi sannsynlighet for at teknologi for et gitt konsept blir kommersielt tilgjengelig fra 2023.

2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028-2035	2036-2050
2	3	4	5	6	7	8	9	10	10	10	10	10	10	10

I fase II har vi i tillegg evaluert hvordan kostnadene forventes å endre seg med tiden knyttet til teknologiutvikling og valgt å differensiere litt mer ved å dele inn i 6 bidrag (se avsnitt IIa.5.4):

- Energi (strøm / drivstoff)
- Investeringer, infrastruktur
- Investeringer, rullende materiell
- Investeringer, nye teknologier (batterier, hydrogen, brenselceller)
- Vedlikehold, infrastruktur
- Vedlikehold, rullende materiell

De 6 bidragene er nærmere omtalt i rapporten fra del b) av prosjektets fase II og benyttet i rapportering av resultater, avsnitt IIa.6.4.

IIa.4.2 Faktorenes innvirkning på ulike konsepters aktualitet

I en totalvurdering av et konsepters aktualitet er det tatt utgangspunkt i at de tre faktorene

- Miljøkrav
- Tilgjengelighet av teknologi
- Tilgjengelighet av regelverk

er absolutte krav som må innfris for at et konsept skal kunne implementeres. Det ville i utgangspunktet være korrekt å benytte en boolsk²¹ variabel for å beskrive om hver av disse faktorene er tilfredsstillt. Men da vi i denne fase II evaluerer konsepters aktualitet over en lang tidshorisont, fram mot 2050, vil vi ivareta usikkerheten eller sannsynligheten for at disse kommer på plass innen et gitt årstall ved å benytte en skala fra 1–10.

Et konsept som det pr i dag (år 2015) kun finnes prototyper av (f.eks. brenselceller i MW-størrelser som egner seg for framdrift av godstog) gis lav score (1–2). Forventningen til at teknologien blir tilgjengelig fra noen leverandører reflekteres i at scoren øker, f.eks. til 5 i år 2018, som illustrert i tabell 8. Hvis sannsynligheten er stor for at teknologien er kommersielt tilgjengelig fem år senere (i 2023) med flere konkurrerende leverandører, angis dette med høy score (9–10).

Tilsvarende metodikk benyttes hvis regelverk ikke er tilgjengelig, og man (med erfaring fra tilsvarende prosesser med etablering av regelverk) forventer at det vil ta et visst antall år før regelverk er implementert.

De to siste faktorene

- Økonomi (inkl. effektivitet)
- Fleksibilitet/Robusthet

²¹En boolsk variabel kan bare innta 2 verdier, som for eksempel “sann/usann”, “ja/nei” eller “0/1” som i databits.

er ulike de tre første, i den forstand at de kun er relevante så fremt de tre første er tilfredsstillt. Når andre faktorer ellers er like, er økonomi avgjørende for valg av konsept. Men både fleksibilitet og robusthet er likeledes avgjørende for jernbaneoperatørene mulighet til å oppnå en akseptabel punktlighet, hvilket er en av de viktigste parameterne jernbanedriften måles etter. Hvis Fleksibilitet/Robusthet er adskillig høyere for ett konsept enn et annet, vil man kunne akseptere en noe høyere kostnad og implementere dette konseptet. Hvis kostnaden derimot er betydelig lavere, vil man trolig (til en viss grad) også kunne akseptere en noe lavere Fleksibilitet/Robusthet. Det vil derfor måtte veies for og i mot når de to siste faktorene evalueres.

Den metode som er benyttet for å kvantifisere aktualitet i fase II av prosjektet er beskrevet i påfølgende avsnitt.

Ila.4.3 Kvantifisering av ulike konsepters aktualitet

De tre første faktorene er hver i sær avgjørende for om konseptet i det hele tatt vil kunne tas i bruk. Det betyr at selv om to av dem er tilfredsstillt, vil mangel på at den tredje er innfridd gjøre konseptet uaktuelt for implementering. Dette uttrykkes matematisk ved en boolsk variabel slik:

- Tilfredsstiller miljøkrav JA
 - Tilgjengelighet av teknologi NEI
 - Tilgjengelighet av regelverk JA
- } OG = NEI

Altså: Selv om miljøkrav og regelverk er på plass, vil det faktum at teknologien ikke er kommersielt tilgjengelig enda, naturlig nok resultere i at konseptet ikke er aktuelt for implementering.

For å ivareta tidsaspektet i vurderingen og den tilhørende sannsynlighet for *når* de enkelte faktorene forventes å bli tilfredsstillt, benyttes skalaen 1–10 (som vist i tabell 8). Den mest korrekte måte å uttrykke dette på, vil være å benytte minimumsverdien av de scores som er gitt for de tre faktorene i de enkelte år. Man ser altså bort fra at både miljøkrav er tilfredsstillt og at regelverket på de fleste områder er på plass for implementering av konseptet i den videre evalueringen (og benytter tallet 3) som vist øverst i tabell 9).

Hvis de to siste faktorene (Økonomi og Fleksibilitet/Robusthet) for konseptet har fått toppscore (altså 10 poeng) i år *X*, er det naturlig at konseptet scorer 3 i år *X*. Hvis derimot økonomien er god (f.eks. 8), mens Fleksibilitet/Robusthet er moderat god (la oss si 6), vil en mulig og hensiktsmessig måte å ivareta de to siste faktorene på være å benytte gjennomsnittet av disse (altså 7). Konseptets aktualitet fremkommer ved å multiplisere minimumsverdien av de tre første faktorene med gjennomsnittet av de to siste som illustrert i tabeller 9 og 10.

Tabell 9: Illustrasjon av hvordan totalscoren for et konsept i År *X* fremkommer, basert på poenggivning for enkeltfaktorene. Metoden er basert på fuzzy logic [43] med tilhørende teori.

Faktorer for aktualitet	År <i>X</i>		
Miljøkrav	10	minimum	4
Tilgjengelighet av Teknologi	4		
Tilgjengelighet av Regelverk	6		
Økonomi	5	Gjennomsnitt	5
Fleksibilitet/Robusthet	5		
Skalering tilbake til utfallsrommet 1-10, samt avrunding til heltall			= 20 / 10 = 2,0
Sammenlagt			2

Tabell 10: Et eksempel for hvordan resultatene ser ut for Batteri-konseptet fra 2015 til 2050.

Faktorer for aktualitet	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2030	2050
Miljøkrav	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Tilgj.het av Teknologi	4	5	6	7	8	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Tilgj.het av Regelverk	6	7	8	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Økonomi	6	6	6	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8	9	9
Fleksibilitet/Robusthet	5	6	7	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Sammenlagt	2	3	4	5	6	7	8	8	8	8	8	8	8	9	9

Ila.5 Definisjon av utvalgte faktorer

I avsnitt Ila.4 ble 5 faktorer for evaluering av ulike konsepters aktualitet fram mot 2050 valgt ut. I dette avsnittet er faktorene definert og nærmere beskrevet.

Ila.5.1 Miljøkrav

At et konsept tilfredsstillende gjeldende miljøkrav er et absolutt kriterium for et konsepters aktualitet for implementering. Vi vil her se bort fra om det i enkelte situasjoner vil kunne gis unntak fra gjeldende miljøkrav.

Definisjon: Faktoren Miljøkrav favner globale og lokale utslipp, samt andre mulige skadevirkninger ved eventuelt drivstoffutslipp til jord, vann og luft (slik parameteren Miljøkonsekvenser var definert i fase I). I denne fase II har vi i tillegg lagt en liten vekt på visuell forurensning, da det forventes motstand mot etablering av kontaktledning i noen områder, så som i nasjonalparker. Score 1 gis for konsepter som forventes ikke å tilfredsstillende gjeldende miljøkrav, mens score 10 gis såfremt konseptet tilfredsstillende alle miljøkrav og i tillegg ikke gir visuell forurensning.

Forventet utvikling og SINTEFs vurdering: Da det er utfordrende å spå hvordan utviklingen vil komme til å bli mht. miljøkrav, benyttes skalaen 1-10 (se tabell 8) for sannsynligheten for at et gitt konsept vil innfri miljøkravene. I lys av den stadige innskjerpingen mht. utslipp fra transport og de strenge miljøkrav som forventes å bli satt i verk, er SINTEF av den oppfatning at hverken konvensjonelle diesellokomotiver eller diesel-elektrisk fremdrift vil kunne innfri miljøkravene etter 2025. For fossilbasert naturgass forventer SINTEF at miljøkrav vil gjøre denne driftsformen uaktuell også etter 2030. Når 2. generasjons biodiesel forventes å bli tilgjengelig (rundt 2020) vil dette alternativet representere en bærekraftig løsning i tråd med miljøkrav, til tross for noen lokale utslipp i form av NO_x og partikler da biodiesel konverteres i forbrenningsmotorer.

Ila.5.2 Tilgjengelighet av teknologi

Tilgjengelighet av teknologi er et absolutt kriterium for et konsepters aktualitet for implementering. Antall tilbydere er også viktig, da dette har innvirkning på konkurranseforhold i markedet og bidrar til kommersiell prisdannelse.

Definisjon: Denne faktoren omfatter den kommersielle tilgjengelighet av lokomotiv med aktuell drivstoff eller framdriftsteknologi.

Hvis konseptet baserer seg på teknologi som er ikke kommersielt tilgjengelig og som det heller ikke er utført reell demonstrasjon av gis score 1. Score 5 gis under forutsetning av at teknologien har vært demonstrert i flere demonstrasjonsprosjekter og er tilgjengelig, men i begrenset omfang og til høy pris. Full score (10) gis dersom teknologien er utbredt og har vært kommersielt tilgjengelig i mer enn 10 år og at drifts- og investeringskostnader er godt dokumentert.

Forventet utvikling og SINTEFs vurdering: Da det også her er utfordrende å spå hvordan utviklingen vil komme til å bli mht. tilgjengelighet, benyttes skalaen 1–10 (se tabell 8) for å angi sannsynligheten for at et gitt konsept vil tilgjengelig i markedet. **SINTEF er av den oppfatning at vi vil komme til å se mange tilbydere av Naturgass- og Biodiesel-drevne lokomotiver allerede innen 2018, mens markedet for batteri- og hydrogentog forventes å være etablert i hhv 2021 og 2023.**

Ila.5.3 Tilgjengelighet av regelverk

Tilgjengelighet av regelverk er et absolutt kriterium for et konsepts aktualitet. Vanligvis er det en rekke ulike regulatoriske rammeverk som skal tilfredsstilles, derunder forskrifter for elektriske installasjoner og for håndtering av gass. Bygging og installasjon av anlegg for energigass²² er underlagt både Brannvernloven og Plan- og bygningsloven.

Definisjon: Faktoren Tilgjengelighet av regelverk omfatter alle tillatelser, forskrifter og direktiver som må innhentes/tilfredsstilles for at et konsept skal implementeres og tas i bruk.

Forventet utvikling og SINTEFs vurdering: Med erfaring fra etablering av regelverk for flytende naturgass i skip (prosessen tok rundt 8 år), er det forventet at det enda vil gå 3–4 år før regelverk for batteri-elektriske tog er på plass, mens tilsvarende for hydrogentog forventes å være på plass rundt 2021.

Ila.5.4 Økonomi

Faktoren økonomi er naturligvis viktig i seg selv, men vil kun ha innvirkning på et konsepts aktualitet såfremt de tre første faktorene er tilfredsstillt (avsnitt Ila.5.1 til Ila.5.3).

Definisjon: I denne faktoren inngår alle deler av kostnader, investerings- samt driftskostnader for rullende materiell, og likeså investerings- samt driftskostnader for infrastruktur. Indirekte inngår også effektivitet av fremstilling og utnyttelse av drivstoff, da lav effektivitet gir en høyere forbruk av primærenergi, og derigjennom høyere kostnad.

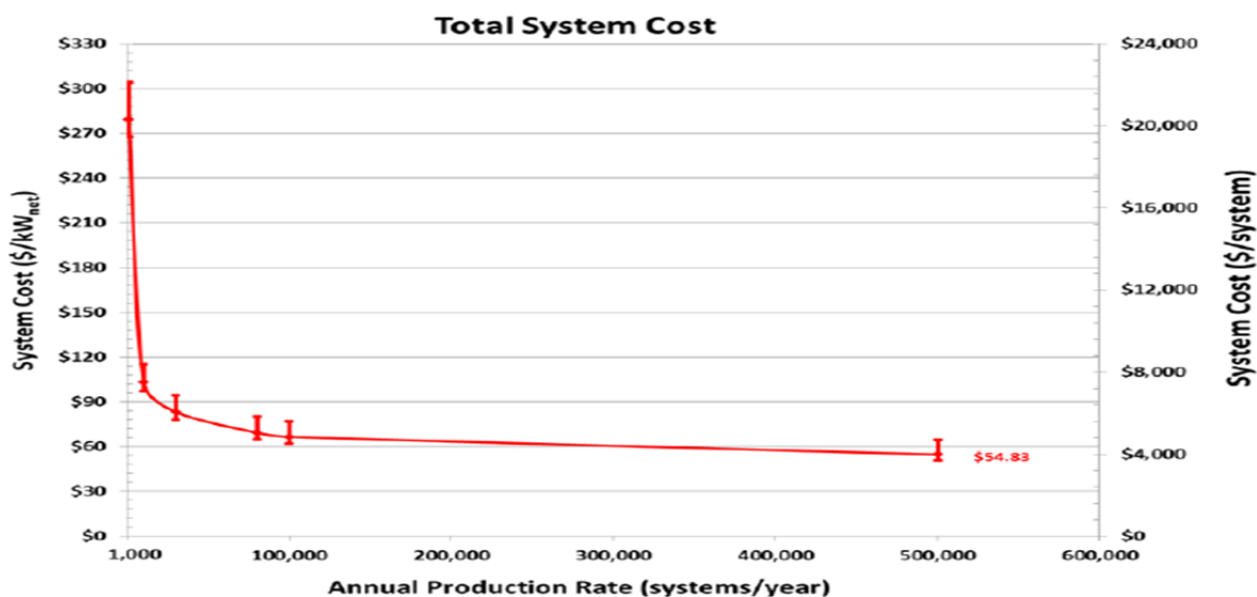
Forventet utvikling og SINTEFs vurdering: Teknologit utvikling gjenspeiler seg vanligvis i reduserte kostnader. Som eksempel har vi valgt å illustrere dette for brenselcelleteknologi (figur 38). Hydrogenkonseptet forutsetter bruk av brenselceller, og kostnader for slike for anvendelser i transport er estimert av US Department of Energy [44].

Når økonomien for ulike konsepter evalueres i del b) av prosjektets fase II, er det også tatt hensyn til forventning til produksjonsvolum. Med henvisning til figur 38 er det **SINTEFs vurdering at den initielle kostnaden for brenselcellesystemet vil være 300 \$/kW i 2015, mens denne faller til 70 \$/kW i 2021, 40 \$/kW i 2030 og 30 \$/kW i 2050. Tilsvarende vurderinger er gjort for de andre alternative konseptene. For detaljer henvises til rapporten fra del b) av prosjektets fase II. For batteriteknologi, der produksjonsvolumene allerede er betydelige, benyttes data for forventet prisutvikling fra anerkjente kilder, så som tekniske rapporter fra US Department of Energy.**

Ila.5.5 Fleksibilitet/Robusthet

Da punktlighet er ett av de viktigste kriterier som jernbanen måles etter er faktoren Fleksibilitet/Robusthet også tatt med i evalueringen i fase II. Faktoren vil i fase II også favne Pålitelighet og Ressurstilgang, som begge var separat parametere i fase I (se tabell 7).

²²Energigass er en samlebetegnelse for biogass, naturgass, propan, butan, hydrogen og andre gasser som brukes til energiformål.



Figur 38: Kostnad (i 2013) for et 80 kW brenselcellesystem for transportformål ved et produksjonsvolum på hhv 1000, 10 000, 30 000, 80 000, 100 000 og 500 000 enheter per år [44].

Definisjon: Flexibilitet/Robusthet av et konsept vurderes ut fra dets evne til å kunne ivareta oppgaven med å levere gods under normal drift, samt løsningens evne til å motstå følger virkninger av eksterne hendelser (f.eks. flom, ras) eller ulykker og påfølgende stengning av strekninger. Togets konkurransevne er (sammenliknet med vegtransport) sterkest for lange strekninger, og påvirkes betydelig av om man kan benytte samme materiell langs hele strekningen.

Forventet utvikling og SINTEFs vurdering: Flexibiliteten avviker betydelig mellom de evaluerte konseptene. Mens elektriske tog med KL kun kan kjøre på strekninger med kontaktledning, vil tog med andre drivstoff eller batteri-elektrisk framdrift kunne kjøre alle steder der infrastruktur for det alternative drivstoffet er tilgjengelig, eller ladestasjoner for batterier til tilstede.

SINTEFs vurdering er at: Diesel(-elektrisk) framdrift har full flexibilitet og regnes som robust teknologi. Elektriske tog med KL er mindre fleksible da de ikke kan benytte strekninger uten KL. Selv om hele landets jernbanenett elektrifiseres, vil vårt krevende nordiske klima (vind, snø og is) gi elektriske tog med KL begrenset Robusthet. Biodiesel og Naturgass forventes å bli like fleksible som diesel fra 2021, da det innen den tid vil kunne etableres en infrastruktur for tanking. Rene batteri-elektriske tog krever betydelig nettkapasitet, og batterienes vekt gjør at lastekapasiteten på godstog reduseres hvis ikke krysningssporene forlenges. Del-elektriske løsninger (delvis utstyrt med kontaktledning) er likeså mindre fleksible og robuste enn konsepter med konvensjonelle og alternative drivstoff. Infrastruktur for hydrogen forventes å bli tilgjengelig innen 10 års tid (2025).

Ila.6 Resultater og diskusjon

Det er her valgt å presentere resultatene faktor for faktor for de 6 konseptene, da diskusjonen ellers ville bli springende. Drivkrefter og barrierer virker gjerne inn på energikilder/bærere (f.eks. elektrisitet) som benyttes i flere konsepter, og diskusjonen blir dermed også enklere å strukturere på denne måten. Sist, men ikke minst, er resultatenes innbyrdes konsistens mellom konseptene lettere å verifisere. For Naturgass gjelder det særegne betraktninger, som er presentert i vedlegg D.

Ila.6.1 Miljøkrav

Erstatning av konvensjonelle, fossilbaserte drivstoff med alternativer som gir mindre miljøbelastning er primært drevet av miljøpolitiske føringer som beskrevet i avsnitt Ila.5.1. Miljøkrav innskjerpes ved jevne mellomrom (se f.eks. figur 33) for å stimulere til ønsket utvikling, og noen konsepter (kombinasjon av enkelte teknologier og drivstoff) vil da med tiden ikke kunne innfri miljøkravene.

Det stilles per i dag ikke krav til utslipp av CO₂ hverken fra skip eller fra tog i Europa. Målsettingen om kraftige utslippsreduksjoner fra transport (60 % innen 2050) generelt, kombinert med ambisjoner om å flytte 50 % av mellomdistanse passasjer- og godstransport (>300 km) fra veg til jernbane og sjø innen 2050 vil imidlertid, slik SINTEF ser det, trolig lede fram mot innføring av restriksjoner for CO₂-utslipp også fra tog og skip. SINTEF forventer videre at den betydelige elektrifiseringen av det europeiske jernbanenettet (spesielt mellom 1990 og 2000 [39]) igjen vil intensiveres og at alternative drivstoff også vil fases inn.

Levetiden for rullende togmateriell er i størrelsesorden 30 år [45], mens det i analysens del b) er benyttet 20 år. Det betyr at miljøkrav som er satt for et gitt år, vil påvirke valg av teknologi når innskjerping i krav varsles, hvilket kan være flere år før kravet trer i kraft (se tabell 6).

Konvensjonelle Diesel-elektriske tog (som er referanse-teknologi i dette prosjektet) erstattes allerede nå gradvis av hybride løsninger²³, da det kun er et marginalt forbedringspotensial for effektivitetsforbedringer²⁴ og utslippskravene stadig skjerpes. **Diesel-hybrid** framdrift gir både lavere lokale og globale utslipp (spesielt for tog som stopper ofte) og redusert drivstofforbruk. Men under forutsetning av at fossil diesel benyttes i slike konsepter, forventer SINTEF at selv diesel-hybride løsninger vil måtte fases ut 10 års tid.

Konvensjonelle, elektriske tog med kontaktledning (KL) anses å være meget miljøvennlige, spesielt hvis elektrisiteten er produsert fra fornybare energikilder. Dette skyldes primært elmotorenes høye effektivitet. KL anses imidlertid å gi visuell forurensning, noe som allerede i dag gjør at det er skepsis til å installere KL i enkelte områder, f.eks. i nasjonalparker. SINTEF forventer at det vil innføres forbud i noen områder fra 2020 og at disse vil skjerpes fra 2025. En moderat negativ miljøpåvirkning gjør at konseptet beholder en høy score på 8 selv i 2050.

Del-elektriske løsninger (KL/batteri) består av at deler av strekningen elektrifiseres med konvensjonell KL. De del-elektriske løsningene vil dermed få noe lavere miljøbelastning (og dermed litt høyere score) enn konvensjonelle, elektriske tog med KL. Høyere utslipp for produksjon av batterier i mindre skala gir en høyere miljøbelastning de første årene, men da slik produksjon ikke er underlagt miljøkrav, får batterikonseptet score 10 fra år 2015. Forventninger til innskjerpede krav til visuell forurensning (KL) reduserer score fra 10 til 9 fra og med 2025.

Batterier for transport benytter materialer som gir høyere miljøbelastning ved utvinning enn det tilsvarende fotavtrykket produksjon av forbrenningsmotorer i masseproduksjon [46]. Det forventes å ta 5 år inntil produksjonen av batterier når storskala volumer. Produksjon av batterier er ikke underlagt miljøkrav, og batterikonseptet får derfor score 10 fra år 2015. SINTEF forventer at det vil kunne innføres miljøkrav til batteriproduksjon²⁵, men at industrien vil klare å innfri disse fram mot 2050.

Det er kun 1. generasjons **Biodiesel** tilgjengelig på markedet i Norge i dag, og denne gir en reduksjon i CO₂-utslipp på ca. 60 % [47]. Fra 2020 forventes 2. generasjons biodiesel (basert på trevirke) å bli kommersielt tilgjengelig og dette gir 90 % reduksjon i CO₂-utslipp sammenliknet med fossilbasert diesel. Da det per i dag ikke stilles miljøkrav til produksjon av biodiesel, gis dette konseptet full score (10) i hele tidsperioden fram til 2050.

Naturgass som drivstoff er på full fart inn i maritim transport. Inntil videre er det likevel en svært liten andel av skip som går på naturgass. Opprettelsen av NO_x-fondet og krav om bruk av gassdrevne ferjer i de store riksveisambandene, har satt fart i utviklingen av gassdrevne fartøy. Naturgassmotorer gir store reduksjoner (80–90 %) i lokale utslipp (NO_x og Partikler), og 10–20 % reduksjon i globale utslipp (CO₂-ekvivalenter) sammenliknet med diesel. Naturgass forventes derfor å representere et drivstoff med akseptabel miljøpåvirkning fram mot 2030. Da

²³Hybride diesel-elektriske tog har en batteripakke som lades opp når toget bremses, og bidrar under akselerasjon.

²⁴Fysiske lover gir absolutte, termodynamiske begrensninger mht. mulig forbedring av virkningsgrad for forbrenningsmotorer. Øvre grense er definert ved Carnot-virkningsgraden og denne vil selv under optimal drift ligge på under 50 %.

²⁵Å la det vi i dag er vant til fra salg av hvitevarer.

lokale utslipp også vektlegges, gis naturgass høy score inntil 2025, hvorpå krav til CO₂-utslipp (som SINTEF forventer vil bli implementert) trolig vil gjøre dette konseptet mindre aktuelt, spesielt etter 2030.

Hydrogen representerer en ny energibærer med potensial for minimal miljøpåvirkning. Under forutsetning av at hydrogen produseres fra fornybare energikilder²⁶, er det kun eventuell transport av hydrogen fra produksjonssted til påfyllingspunktet som påvirker miljøet. På grunn av hydrogens lave energitetthet sammenliknet med f.eks. diesel, forventes det at slik transport vil gi en viss miljøbelastning de første årene. Det stilles imidlertid ikke krav til effektiviteten for drivstofftransport. Kontainerløsninger for effektiv transport av hydrogen langs vei, sjø og bane er utviklet av norske Hexagon Composites [48] på Raufoss. Disse forventes å introduseres i markedet innen 2020. I de økonomiske beregningene foretatt i fase IIb av prosjektet, er det forutsatt at hydrogen produseres på stasjonsområdet. Derfor gis hydrogenalternativet full score mht. miljøkrav fra 2015 til 2050.

Tabell 11: Resultater for faktoren Miljøkrav, slik SINTEF vurderer trendene og forventet innskjerping av utslippskrav, i tråd med EUs mål om å redusere CO₂-utslippet fra transport.

Driftsform	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2030	2050
Diesel (-elektrisk)	10	9	9	8	8	7	7	6	6	5	4	3	2	1	1
Elektrisk (KL)	10	10	10	10	10	9	9	9	9	9	8	8	8	8	8
Del-elektrisk	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9	9	9	9	9
Batteri	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Biodiesel	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Naturgass	10	10	10	9	9	9	9	8	8	8	7	7	7	4	2
Hydrogen	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

Score for faktoren Miljøkrav er sammenfattet i tabell 11. Disse inngår i totalevalueringen av konsepter i avsnitt Ila.7. I 2021, er det Diesel(-elektrisk) som kommer dårligst ut, da SINTEF forventer at man også, innen noen års tid, vil innføre restriksjoner på CO₂-utslipp fra skip og tog. Til tross for at disse transportformene er mer energi-effektive enn veitransport, vil målene om å flytte mye av transporten over på skip og tog trolig lede til skjerpene utslippskrav. I 2027 forventer SINTEF at diesel-elektriske ikke vil kunne innfri kravene, mens det i 2050 forventes at hverken diesel eller fossilbasert naturgass vil kunne innfri miljøkravene.

Ila.6.2 Tilgjengelighet av teknologi

I tråd med EU-kommisjonens ambisjoner, forventer SINTEF at det vil gis et totalforbud mot å kjøre **diesel-elektriske** tog basert på fossile drivstoff i 2050. Med en levetid på 20–30 år for rullende jernbanemateriell betyr det at etterspørselen etter Diesel(-elektriske) lokomotiver kan begynne å avta fra og med 2020. Antall produsenter og leverandører av diesel-elektriske tog ville i så måte kunne forventes å falle og dermed føre til redusert tilgjengelighet. Men da store forbrenningsmotorer av denne typen også benyttes for biodiesel, og dette konseptet forventes å få en viss utbredelse, forventes tilgjengelighet av lokomotiver for diesel-elektrisk framdrift å forbli høy.

Tilgjengeligheten av teknologi for **Elektriske tog med KL** forventes å forbli høy og uendret i et 2050-perspektiv, da slik teknologi representerer et miljøvennlig og effektivt alternativ.

Del-elektriske og rene **batteri-elektriske** løsninger forventes parallelt å bli tilgjengelige med flere konkurrerende tilbydere fra rundt 2020. Fra da av, forventes disse konseptene å forbli tilgjengelige i et 2050-perspektiv.

Biodiesel som drivstoff i tog er allerede på vei inn, og forventes å bli tilgjengelig fra flere tilbydere av rullende materiell før 2020. Infrastruktur for biodiesel avviker lite fra konvensjonell diesel og anses som kommersielt tilgjengelig teknologi allerede i dag. Logistikken for 1. generasjons biodiesel er imidlertid noe mer krevende knyttet til degradering av drivstoffet.

Naturgassmotorer for maritim framdrift er allerede tilgjengelig, men antall tilbydere er så langt begrenset. Anvendelse av naturgass er allerede demonstrert for jernbanedrift, og tilgjengeligheten av rullende materiell med naturgass som drivstoff forventes å øke fram mot 2020. Infrastruktur for naturgass anses som kommersielt

²⁶Denne forutsetningen har vært gjort i fase I og benyttes også her i fase II.

tilgjengelig teknologi allerede i dag. På lik linje med diesel(-elektrisk) framdrift, forventes antall tilbydere av lokomotiver med naturgass som drivstoff å avta fra 2025. *Men:* Biogass anvendes allerede som drivstoff i busser og anses som et meget miljøvennlig og bærekraftig alternativ. Da forbrenningsmotorer for naturgass med mindre justeringer vil kunne benytte biogass, forventes at tilgjengeligheten av teknologi forblir høy i et 2050-perspektiv.

Hydrogenteknologi (brenselceller) for framdrift av kjøretøyer har vært demonstrert i mer enn 50 år, men for fremdrift av tog er teknologien fremdeles på pilotstadiet. Det er konkrete planer fra selskapet Alstom om å sette persontog i prøvedrift i 2018 (jfr. avsnitt IIa.3.3.2). SINTEF forventer likevel at det vil gå nærmere 10 år før et tilstrekkelig antall produsenter vil kunne tilby rullende jernbanemateriell med hydrogen som drivstoff og at dette markedet kan anses som etablert.

Tabell 12: Resultater for faktoren Tilgjengelighet av teknologi. Tilgjengelighet av naturgassmotorer forventes å forbli høy fram til 2050, da disse kan benyttes for biogass.

Driftsform	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2030	2050
Diesel (-elektrisk)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Elektrisk (KL)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Del-elektrisk	4	5	6	7	8	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Batteri	4	5	6	7	8	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Biodiesel	4	6	8	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Naturgass	7	8	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Hydrogen	2	3	4	5	6	7	8	9	10	10	10	10	10	10	10

Resultater for faktoren Tilgjengelighet av teknologi er sammenfattet i tabell 12. Mens det i 2015 kun er 2 konsepter som er kommersielt tilgjengelige fra mange tilbydere, forventer SINTEF at teknologi for alle de vurderte konseptene vil være tilgjengelige fra og med 2023.

IIa.6.3 Tilgjengelighet av regelverk

I likhet med de to forutgående faktorene (beskrevet i avsnittene over) er tilgjengelighet av regelverk et absolutt kriterium for at et konsept vil kunne være aktuelt for implementering i det norske jernbanenettet.

Regelverk for **Diesel(-elektriske)** og **KL-elektriske** driftsformer er tilgjengelig og forventes å bestå i et 2050-perspektiv. **Biodiesel** er i så måte tilnærmet identisk med Diesel og alle disse tre konseptene er derfor gitt score 10 over hele perioden fram til 2050.

Regelverk for bruk av flytende naturgass som drivstoff i skip allerede er etablert. Med nærmere 15 års erfaring fra bruk av naturgass i skip forventes det at dette regelverket vil kunne tilpasses anvendelse av **naturgass** som drivstoff i jernbanedrift i løpet av 3–4 års tid (2018).

For det **del-elektriske** og **batteri**-konseptet er regelverk tilgjengelig for vegtransport. Den første rene batteri-elektriske ferjen ble satt i drift i 2015 i Norge, og prøvedrift av det første rene batteri-elektriske persontog er nylig igangsatt i Storbritannia. Godstog krever langt større ytelse (trekkraft i MW) og det forventes at det kan ta 4 år før regelverk for bruk av batteri-teknologi i jernbanedrift blir tilgjengelig.

Lagringstanker for bruk av **hydrogen** som drivstoff i personbiler (ved 700 bars trykk) ble første gang godkjent i 2003 og siden er et internasjonalt regelverk og protokoller for hydrogenfylling for personbiler og busser etablert. Innen eksisterende regelverk for transport av hydrogen er det begrensninger for maksimal tankstørrelse i Europa. Det arbeides med å revidere regelverket (ref. Per S. Heggem, Hexagon). Sammenliknet med de andre konseptene, er det større behov for tilpasninger av eksisterende regelverk for hydrogen fra andre segmenter av transport til jernbanedrift. Noe avhengig av produsentenes engasjement på området, forventes det at regelverk for hydrogen som drivstoff til jernbanedrift vil være på plass rundt 2021.

I 2015 finnes det regelverk for 3 av de 7 konseptene, Bio- og Diesel-elektrisk og KL-elektrisk framdrift. Allerede i 2021 regner SINTEF med at regelverk for alle de evaluerte konseptene vil være tilgjengelig.

Tabell 13: Resultater for faktoren Tilgjengelighet av regelverk

Driftsform	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2030	2050
Diesel (-elektrisk)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Elektrisk (KL)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Del-elektrisk	6	7	8	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Batteri	6	7	8	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Biodiesel	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Naturgass	7	8	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Hydrogen	4	5	6	7	8	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10

Ila.6.4 Økonomi

Som for alle teknologier, er kostnader for rullende materiell for jernbanen også avhengig av produksjonsvolum (se eksempel i avsnitt Ila.5.4).

Kostnader for teknologi påvirkes også vanligvis av kravet til levetid for teknologien, og denne varierer betydelig mellom transportsegmentene. Personbiler har f.eks. en total “levetid” på typisk 15–20 år eller 200 000–500 000 km, mens bussmotorer gjerne kjører 100 000 km/år og fordrer tilsvarende en levetid på 1 million km.

Det er viktig å påpeke at økonomien er evaluert gitt dagens nivå mht. avgifter. Mulige endringer i beskatning av drivstoff i tiden som kommer er altså ikke hensyntatt. For naturgasskonseptet er det forutsatt produksjon fra fossile kilder: dette forventes å gi tilnærmet samme kostnad som for diesel. For hydrogen er det forutsatt at all produksjon skjer gjennom vannelektrolyse, med energi fra fornybare kilder og på hydrogenstasjoner eid og drevet av Jernbaneverket.

Økonomien for ulike driftsformer er avhengig av hvilken banestrekning vi ser på. Kostnadene varierer med faktorer som trafikk tetthet, strekningens lengde og topografi. For implementering av kontaktledning (KL) virker også geografiske forhold inn (antall tunneler, broer etc.), men sistnevnte forhold er ikke spesifikt hensyntatt i estimater av kostnader.

Det vises til fase IIb av prosjektet for detaljerte resultater for kostnader for ulike driftsformer på utvalgte banestrekninger. Her baserer vi evalueringen på de konkrete resultater som er framkommet i IIb. Da variasjonene i kostnader for ulike driftsformer er store mellom de utvalgte strekningene²⁷, er det ikke hensiktsmessig å generalisere og benytte gjennomsnittstall for utvalgte banestrekninger. Vi har i denne del a) i samråd med Jernbaneverket valgt å bruke Rørosbanen som basis for evaluering av faktoren økonomi²⁸.

Fordelingen av kostnader mellom investeringer og drift er rapportert i del b) av prosjektet. Resultatene for Rørosbanen er gjengitt i figur 39.

I del a) av fase II har vi i henhold til kontrakten evaluert de konseptene som ble valgt ut i fase I. I del b) av fase II er det lagt til kombinasjoner for konseptene Del-elektrisk og Hydrogen, da størrelsen av ulike delsystemer virker inn på kostnadene.

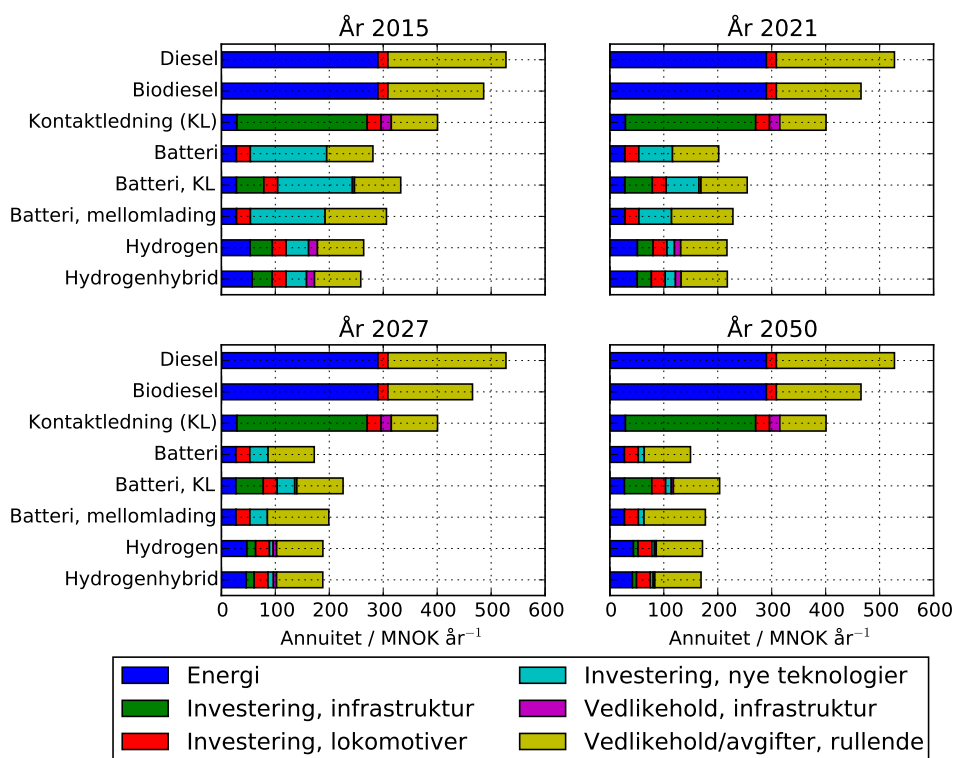
Scorene som er gitt for faktoren Økonomi her i del a) av fase II er normalisert ift. resultatene fra del b) vist i figur 39. Resultatene for faktoren Økonomi for Rørosbanen er vist i tabell 15. Mens Hydrogenkonseptet gir den laveste kostnaden i 2015, forventes batteriene å bli like billige i 2021. Fram mot år 2050 viser estimatene at batterier blir noe billigere enn hydrogen, men forskjellene er små. Del-elektrisk framdrift viser seg også å bli økonomisk interessant mot 2050.

Ila.6.5 Fleksibilitet/Robusthet

Elektriske tog med kontaktledning (KL) har vist seg å være mindre robuste enn alternativene (uten KL), da KL er utsatt for nedrivning. Elektriske tog har også lav fleksibilitet i den forstand at de kun kan kjøre på elektrifiserte banestrekninger. Påliteligheten til elektriske tog (når KL er operativ) er imidlertid meget høy. Fra et nivå på 5 i

²⁷Nordlandsbanen, Rørosbanen, Solørbanen og Raumabanen.

²⁸Nordlandsbanen er spesiell fordi den er meget lang og Raumabanen fordi den er så bratt, og begge strekninger har og har lav trafikk tetthet.



Figur 39: Økonomisk vurdering av forskjellige teknologier for Rørosbanen (gjengitt fra fase IIb). Alle kostnader er uttrykt i 2015-kroner.

Tabell 14: Oversikt over hvilke konsepter som er inkludert i fase I og II av prosjektet.

Konsepter i fase I og del a) av fase II	Tilsvarende konsepter i fase II del b)
Diesel (-elektrisk)	Diesel
Elektrisk (KL)	Kontaktledning (KL)
Batteri	Batteri
Del-elektrisk	i) Batteri, KL (deler av strekning m/KL) ii) Batteri, mellomlading
Biodiesel	Biodiesel
Naturgass	Antatt lik diesel, se del b) for nærmere info
Hydrogen	i) Hydrogen ii) Hydrogenhybrid (brenselcelle + batteri)

Tabell 15: Resultater for faktoren Økonomi for utvalgt banestrekning Rørosbanen.

Driftsform	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2030	2050
Diesel (-elektrisk)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Elektrisk (KL)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Del-elektrisk	6	6	6	6	6	7	7	7	7	7	7	8	8	8	8
Batteri	6	6	6	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8	9	9
Biodiesel	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Naturgass	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Hydrogen	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	8	8	8	8	9

2015 forventes denne faktoren å bedres noe (til 7) de neste tiårene fram mot 2050, da KL er og blir sårbar under ekstreme værforhold.

Diesel-, Biodiesel- og Naturgass-konseptene kan kjøre langs alle jernbane-strekninger forutsatt at sporene og signalanlegg er intakt. Alle disse tre konseptene kan også benyttes på lange strekninger og dermed bidra til å styrke togets konkurransevne hvilket gir høy score.

Biodiesel og **Naturgass** scorer litt lavere enn Diesel per 2015, men fra 2020 forventes også disse konseptene å gi fleksible og robuste løsninger. Lavere score de første 6 årene er knyttet til begrenset tilgang på drivstoff sammenliknet med konvensjonell fossilbasert diesel.

Batteri- og Hydrogentog forventes også å bli fleksible og robuste, men scorer noe lavere knyttet til lavere forventet pålitelighet de første årene og deres respektive behov for utbygging av infrastruktur. Ladestasjoner for batteritog og tilgang på hydrogen forventes å være på plass fra hhv 2020 og 2025. Dette gir lavere redundans i rutenettet de første 5-10 årene mens Batteritog-konseptet begrensede rekkevidde begrenser muligheten for gjennomgående rutetilbud på lange strekninger, hvilket gjør at score for denne faktoren forblir på 8 mot 2050.

Tabell 16: Resultater for faktoren Fleksibilitet/Robusthet.

Driftsform	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2030	2050
Diesel (-elektrisk)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Elektrisk (KL)	5	5	5	6	6	6	6	7	7	7	7	7	7	7	7
Del-elektrisk	7	7	7	7	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8	8
Batteri	5	6	7	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Biodiesel	9	9	9	9	9	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Naturgass	9	9	9	9	9	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Hydrogen	4	4	5	5	6	6	7	7	8	9	10	10	10	10	10

Resultatene for faktoren Fleksibilitet/Robusthet kan oppsummeres som følger: I 2015 er det kun Diesel, Biodiesel og Naturgass som gir robuste løsninger med høy fleksibilitet. Men allerede i 2021 forventer SINTEF at batterielektriske tog også vil bli robuste. Det vil trolig ta enda 4 år (2025) før Hydrogentog vil bli et fullverdig alternativ, da brenselcellesystemer i MW-størrelse for transportformål enda ikke er demonstrert, og tilgjengeligheten av hydrogen som drivstoff også forventes å være en begrensning i en god del år. Erfaring fra det europeiske demonstrasjonsprosjektet av hydrogenbusser CHIC [49], viser at regulariteten har vært lav (60–80 %), mens punktligheten (for de bussene som er i drift) har vært høy. Regulariteten for personbiler har imidlertid vært svært høy (98 %) i demonstrasjonsprosjektet H2moves Scandinavia [50].

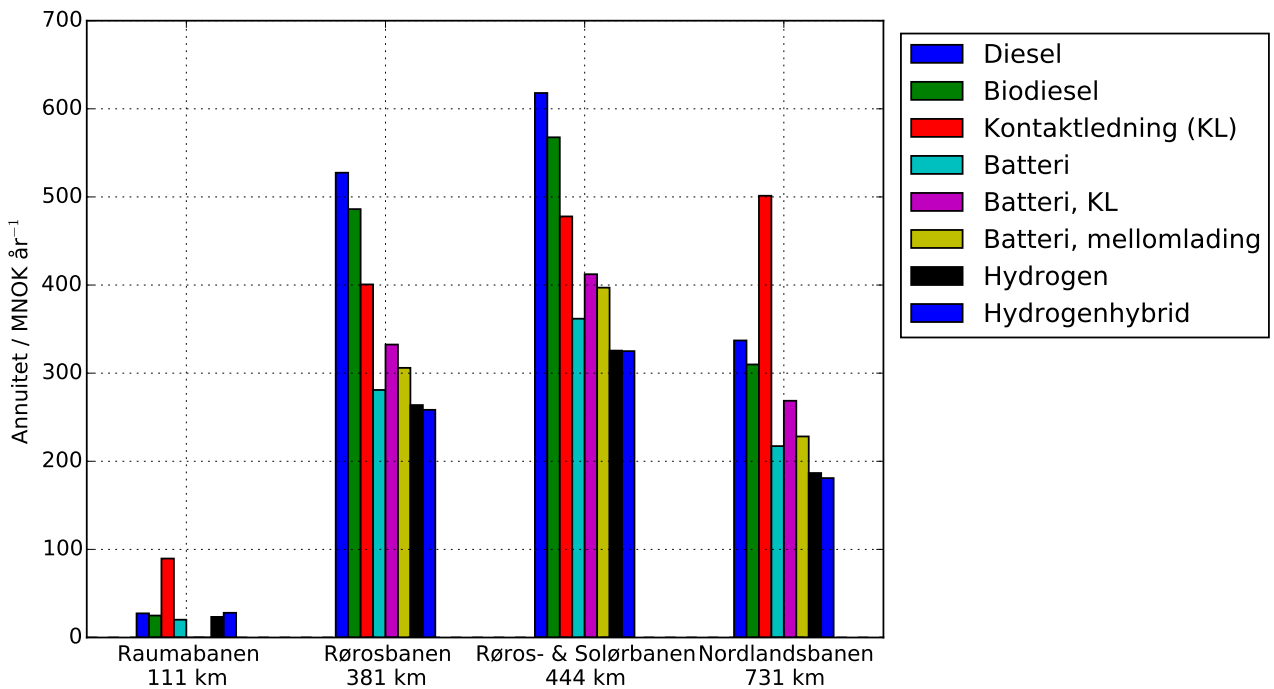
Ila.6.6 Sensitivitet mht. trafikk tetthet

Resultatene for totale kostnader for ulike banestrekninger i år 2015 fra del b) er gjengitt i figur 40. Som vi ser er kontaktledning det dyreste alternativet på lange strekninger (Nordlandsbanen) og baner med lav trafikk tetthet (Raumabanen). Da målet både i EU og i Norge er å flytte en betydelig andel godstransport fra veg til bane og sjø, er det av interesse å evaluere hvordan økt trafikk tetthet for en gitt strekning virker inn på kostnaden for de ulike konseptene som er vurdert i denne utredningen.

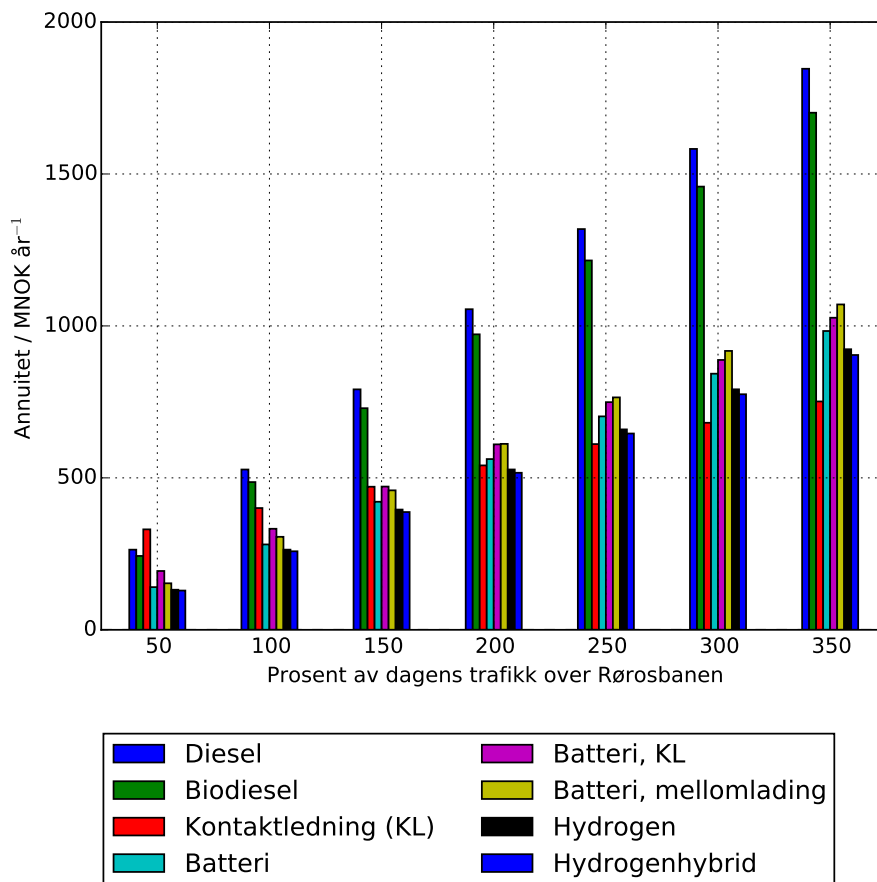
En sensitivitetsanalyse mht. trafikk tetthet er foretatt for Rørosbanen som vist i figur 41, med utgangspunkt i dagens trafikk (100 %). Hvis trafikken blir halvert (50 %) er kontaktledning det klart dyreste alternativet, mens hvis tettheten fordobles (200 %) er kostnaden for kontaktledning tilnærmet den samme som for Batterikonseptene. For at kostnaden for kontaktledning skal bli lavere enn kostnaden for hydrogenkonseptene, må trafikk tettheten være 2,5 ganger høyere enn i dag. Det vil naturligvis være begrenset kapasitet på en enkeltsporet strekning, men dette er det ikke tatt hensyn til i analysen foretatt her.

Ila.7 Konklusjoner: Ulike konsepters aktualitet i 2021, 2027 og 2050

I dette avsnittet er resultater fra foregående avsnitt Ila.6 sammenfattet. Totalvurderingen er foretatt etter metoden som beskrevet i avsnitt Ila.4. Faktorene som er benyttet er definert og nærmere beskrevet i avsnitt Ila.5.



Figur 40: Totale kostnader for de evaluerte konseptene på ulike banestrekninger i 2015, gitt dagens trafikk tetthet.



Figur 41: Årlige kostnader (annuitet) for ulike framdriftskonsept som funksjon av trafikk tetthet for Rørosbanen. Det er ikke tatt hensyn til begrensninger i banens kapasitet.

For 2015, viser resultatene at den beste løsningen for ikke-elektrifiserte baner er å fortsette å benytte konvensjonell diesel. I henhold til prosjektbeskrivelsen er aktuelle konsepters aktualitet i 2021, 2027 og 2050 er diskutert i påfølgende avsnitt.

Ila.7.1 Aktuelle konsepter for implementering i 2021

Fra tabell 17 kan det konkluderes at **de mest aktuelle konseptene for innfasing i 2021 er Batteri, Biodiesel og Del-elektrisk**. **Hydrogen** scorer en sekser, men regnes som prematur for innfasing i 2021. For **Hydrogen** trekker begrenset tilgang på teknologi (8) og Fleksibilitet/Robusthet (7) noe ned, grunnet forventet begrensning i tilgang på drivstoff. Det Del-elektriske konseptet scorer totalt bedre enn hydrogen da tilgjengelighet forventes å være bedre. Både **Batteri- og Biodiesel**-konseptene gir miljøgevinster sammenliknet med Diesel-elektriske tog. Mens Batteritog i 2021 scorer høyere (8) enn Biodiesel (3) på faktoren Økonomi, scorer Biodiesel høyere (10) enn Batteritog (8) på Fleksibilitet/Robusthet. Sistnevnte skyldes primært begrenset rekkevidde for Batteritog.

Tabell 17: Sammenfatning av resultater av evaluering i fase II. Da det er valgt å benytte resultater for Rørosbanen som input for faktoren økonomi, vil resultatene for de andre banene avvike noe.

Driftsform	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2030	2050
Diesel (-elektrisk)	6	5	5	5	5	4	4	4	4	3	2	2	1	1	1
Elektrisk (KL)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4
Del-elektrisk	3	3	4	5	5	6	7	8	8	8	7	7	7	7	7
Batteri	2	3	4	5	6	7	8	8	8	8	8	8	8	9	9
Biodiesel	2	4	5	6	6	6	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Naturgass	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4	2	1
Hydrogen	1	2	2	3	4	5	6	6	8	8	9	9	9	9	10

To konsepter, **Naturgass** og **KL-elektrisk** fremdrift (med KL), scorer totalt 5 poeng i år 2021 og er begge vurdert til å være en bedre løsning enn referansen, Diesel-elektrisk framdrift. For Naturgass er det økonomien som trekker ned (2), under forutsetning av at kostnadene er de samme som for fossilbasert diesel. Dette er en forutsetning som naturligvis kan diskuteres, da dagens naturgasspriser er spesielt lave. Det er her også viktig å påpeke at Naturgass-konseptet er kompatibelt med bruk av biogass. Biogass vil trolig ikke avgiftsbelegges, og kan dermed komme adskillig gunstigere ut enn Naturgass.

Diesel-elektriske tog kommer dårligst ut i 2021, og dette skyldes primært høye drivstoffkostnader for Diesel-elektrisk framdrift (2).

Med den usikkerhet som ligger i slike evalueringer (inkludert forventninger til teknologi- og prisutvikling), ser vi at alle konseptene (se tabell 17) scorer bedre enn referanseteknologien Diesel(-elektrisk) framdrift. Hvilke konsepter som viser seg å bli de beste for implementering, er også avhengig av hvor mye klima- og miljøfaktorene vektlegges i tiden som kommer. Da levetiden for togmateriell typisk er flere tiår, er det viktig å se langt fram i tid når man velger konsepter for implementering. I personbil-verden kalles dette for “future-proof solutions” [51], altså løsninger som er kompatible med kriterier for en bærekraft utvikling, gir null-utslipp og er basert på fornybare ressurser uten nevneverdige begrensninger mht. ressurstilgang.

Ila.7.2 Aktuelle konsepter for implementering i 2027

I 2027 utkrystalliserer det seg at nullutslippsalternativene egner seg best for implementering. **Hydrogen-** og **Batteri**-konseptene kommer best ut med hhv 9 og 8 poeng. Mens økonomien forventes å bli tilnærmet lik (7) for disse to konseptene, er det begrensninger i rekkevidden for Batterikonseptet som reduserer faktoren Fleksibilitet/Robusthet til 8 vs. 10 for hydrogen.

Biodiesel og **Del-elektriske** løsninger kommer også relativt godt ut (med 7 poeng) i 2027, da begge disse forventes å tilfredsstille miljøkrav, samt at teknologi og regelverk ikke forventes å gi noen begrensninger. Mens totaløkonomien for Del-elektrisk løsning forventes å være bedre (7) enn for biodiesel (3), er fleksibiliteten bedre for Biodiesel (10) enn for den Del-elektrisk løsningen (8).

Naturgass får en totalscore på 4 poeng i 2027, og dette skyldes primært økonomi (2), men også miljøkrav (7). Det henvises til avsnitt IIa.7.1 for refleksjoner rundt kostnader for naturgass og potensialet for å kjøre denne type tog på biogass.

Elektriske tog med KL vil fortsatt kunne være et aktuelt konsept for strekninger med høy trafikk tetthet i 2027, men scorer moderat (4) da dagens lave trafikk tetthet er lagt til grunn i denne evalueringen.

Konvensjonell **Diesel(-elektrisk)** drift vil ikke være kompatibel med de miljøkrav som SINTEF forventer vil bli implementert i Europa innenfor rullende materiells levetid.

IIa.7.3 Aktuelle konsepter for implementering i 2050

Sammenliknet med tallene for år 2027, er det kun **Naturgass**-konseptets aktualitet som reduseres fram mot 2050. Det er den forventede innskjerpingen i miljøkrav som gir dette utslaget. Da man skal redusere utslippet fra transportsektoren i Europa med 60 % innen 2050, og strategiske føringer går i retning av å overføre store mengder gods fra veg til bane og sjø, er SINTEF av den oppfatning at det med stor sannsynlighet ikke vil aksepteres at man benytter fossile energikilder i jernbanetransport. Det betyr at det kun er nullutslippsløsningene som utgjør aktuelle driftsformer i 2050. Med dagens trafikk tetthet kommer **Hydrogen-** og **Batteri-**konseptet best ut i 2050. **Biodiesel** vil miljømessig være akseptabel også i 2050, men da det forutsettes bruk av forbrenningsmotor og effektiviteten for disse ikke forventes å bedres i betydelig grad selv i dette tidsperspektiv, er det totalt sett dårlig utnyttelse av primærenergi å implementere denne driftsformen. **Del-elektriske** løsninger (med KL) vil også gi nullutslipp, men vil kun bli aktuell hvis kostnaden for KL reduseres betydelig fra dagens nivå eller hvis trafikk tettheten øker.

IIa.7.4 Sammenfatning av resultater

- For 2015 viser resultatene at den beste løsningen for ikke-elektrifiserte baner er å fortsette å benytte konvensjonelle Diesel-elektriske tog.
- I 2021 er Biodiesel, Batteri-elektrisk framdrift og Del-elektriske løsninger de beste, men Naturgass og Hydrogen Hydrogen som alternativ til konvensjonell elektrifisering med KL kan også bli aktuelle.
- I 2027 er Hydrogen- og Batteri-konseptene best egnet for implementering, mens Del-elektriske og Biodiesel også representerer akseptable løsninger.
- I år 2050 er nullutslippsløsningene de som utgjør de mest aktuelle driftsformer, da i form av Hydrogen, Batteri og Del-elektriske løsninger og kombinasjoner av disse. Biodiesel er også en akseptabel løsning, men lokale utslipp og lav virkningsgrad gir dårlig total energiutnyttelse for dette konseptet da forbrenningsmotor benyttes.

Disse konklusjoner er i konsistente med de generelle betraktninger som ekspertgruppen i NGVA er kommet med (se avsnitt IIa.3.1), der de konkluderer med at for jernbanen, vil elektriske løsninger og biomasse være foretrukne alternativer.

Hovedkonklusjonen fra fase II av prosjektet Alternative drivstoff for ikke-elektrifiserte baner er som følger:

Transportsektoren er under endring med høyt fokus på klima- og miljøutfordringer. Vi er vitne til en meget rask teknologiutvikling innen hybridisering av drivlinjer og spesielt innen batteri- og hydrogenteknologi. SINTEF har avdekket at det allerede i dag finnes teknologiske løsninger som vil kunne eliminere utslippene fra jernbanetransport til en betydelig lavere kostnad enn konvensjonell elektrifisering med kontaktledning giitt dagens trafikk på de vurderte jernbanestrekningene. Det forventes at flere nye, alternative løsninger for nullutslipp vil bli tilgjengelig for implementering i jernbanetransport mellom 2020 og 2030. SINTEF anbefaler derfor at nye, alternative løsninger for nullutslipp inkluderes når framtidig driftsform for gjenværende ikke-elektrifiserte strekninger skal utredes nærmere.

Fase IIb

Energetiske og økonomiske beregninger

Sammendrag

Denne delen evaluerer alternativer til elektrifisering av ikke-elektrifiserte jernbanestrekninger i Norge ved bruk av batterier, brenselceller eller hybridløsninger derav.

I første avsnitt presenteres togmateriellet, deriblant relevante lokomotiver, løsninger for transport av batterier og hydrogen, og dimensjonering av disse.

Profiler for energiforbruk, trekkraft og andre relevante fysiske enheter beregnes og presenteres på følgende avsnitt for Nordlandsbanen, Rørosbanen, Solørbanen (herunder tømmertransport fra Østerdalen til Sverige), og Raumabanen. Fokus er alltid på godstog, med en bestemt konfigurasjon som benyttes på alle baner, med unntak av Raumabanen pga. dens bratte stigning. For Raumabanen vurderes forøvrig også persontransport.

I siste avsnitt rapporteres resultatene fra en økonomisk vurdering av alternativene.

IIb.1 Togmateriell

Jernbaneverket leverte data for togmateriell i XML-format, som beskrev egenskaper til forskjellige lokomotiver og vognformasjoner, og med en PDF-fil som beskrev egenskapene til enkelte vogner [52].

IIb.1.1 Referansetog

Etter avtale med Jernbaneverket, vil rapporten fokusere på godstog, fordi godstrafikk er dimensjonerende for jernbaner. Godstog er nemlig mye tyngre enn persontog, forbruker størsteparten av energien (i form av drivstoff eller strøm) på de fleste strekninger, og sliter mest på infrastrukturen; godstog er også mer utsatt for problemer ved høyt stigningstall.

I tillegg er det vanskeligere å utruste motorvognene som ofte brukes på ikke-elektrifiserte strekninger med alternative energikilder, da dette forutsetter en endring i selve motorvognen; i godstog er dette lettere implementert ved at man legger til én eller flere vogner som frakter batterier, hydrogen og lignende.

Som referansetog for alle banene velges et godstog²⁹ med et CD 312-lokomotiv og 28 godsvogner, med samlet vekt på 1000 t og samlet lengde på 575 m. Hele toget har makshastighet på 90 km/h, bestemt av godsvognene.

IIb.1.2 Lokomotiver

To lokomotiver er aktuelle i denne studien: dieseldrevne CD 312 (Vossloh Euro 4000 Freight) og elektrisk drevne CE 119 (Bombardier TRAXX AC), avbildet i figur 42. Disse lokomotiver er de nyeste som er tatt i bruk av CargoNet på det norske jernbanenettet; de viktigste parametrene for disse er presentert i tabell 18.

Tabell 18: Sammenligning av diesel- og el-lokomotiver; data fra Jernbaneverkets kapasitetsutreder Torben Brand.

Kode	Navn	Type	Effekt MW	Starttrekkraft kN	Topp hastighet km/h	Vekt t	Lengde m
CD 312	Vossloh Euro 4000	diesel	3,15	400	120	123	23
CE 119	Bombardier TRAXX	elektrisk	5,58	300	140	85	19

²⁹Formasjons-ID fo-CD312-600m i den overleverte XML-fil.



(a) Dieseldrevne CD 312 (© David Gubler)



(b) Elektriske CE 119 (© Eivindtoreid, Wikipedia)

Figur 42: CargoNets elektriske og dieseldrevne lokomotiver for godstog.

Det skal bemerkes at elektriske CE 119 kjører med 15 kV AC; batteri og brenselceller produserer DC strøm. En løsning er å bruke en annen variant av Bombardier TRAXX, nemlig TRAXX MS, som kan kjøre både på 15 kV AC og 3 kV DC, med samme ytelse; brenselceller og batterier antas derfor dimensjonert til å levere 3000 V. TRAXX MS er ellers identisk med TRAXX AC (altså CE 119), som CargoNet benytter [53]. TRAXX MS vil dermed kunne kjøre både i områder med og uten kontaktledning; når kontaktledning er tilgjengelig vil det i tillegg være mulig å lade batteriene under kjøring. Det antas at kostnaden for TRAXX MS er den samme som for TRAXX AC, men dette vil måtte verifiseres med leverandør.

Som det fremgår av tabell 18, kan det elektriske lokomotivet levere mer *effekt*, men mindre *trekkraft*, enn diesellokomotivet. Denne tilsynelatende selvmotsigelsen skyldes at diesellokomotiver er gjerne betydelig tyngre enn elektriske på grunn av forbrenningsmotoren og dieseltankene: større vekt innebærer større friksjon mellom hjul og skinner³⁰. Dette betyr at diesellokomotiver har bedre akselerasjon og kan kjøre mot brattere stigning enn tilsvarende elektriske lokomotiver, men har lavere topphastigheter.

IIb.1.2.1 Regenerativ bremsing

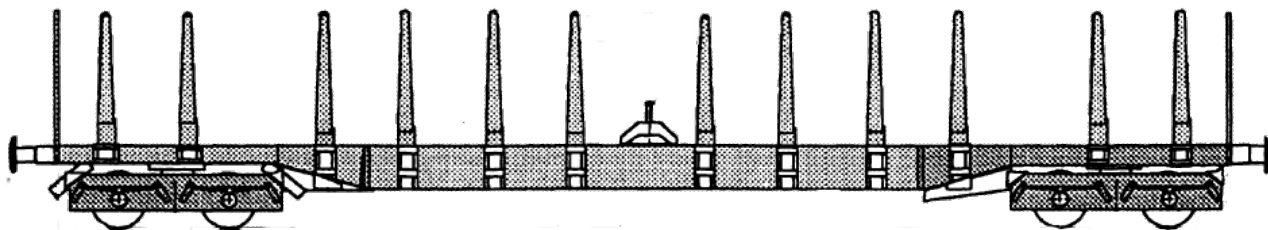
Regenerativ bremsing er muligheten til å gjenvinne potensiell eller kinetisk energi istedenfor å miste den som varme i bremsene; den gjenvunne energien kan senere brukes til framdrift. Regenerativ bremsing kan redusere det totale energibehovet til en togreise, men bremseenergien må da kunne lagres.

Av alternativene som omtales i denne rapporten, er det kun kontaktledning og batteri som kan lagre energi fra regenerativ bremsing. Muligheten til å generere hydrogen ved hjelp av elektrolyse (vannspalting) anses ikke praktisk gjennomførbart, på grunn av det store, tunge og kompliserte systemet som ville kreves.

Det største potensialet for regenerativ bremsing finnes for tunge godstog som kjører lange, bratte strekninger, for eksempel nedover fra Saltfjellet på Nordlandsbanen.

Det antas at 50 % av togets kinetiske energi ved bremsing kan gjenvinnes ved regenerativ bremsing; dette innbefatter forskjellige typer tap, som f.eks. overføring langs kontaktledning eller omforming til DC-elektrisitet ved riktig spenning for batteriene. Tallet er trolig noe konservativt og kan variere; beregninger viser at regenerativ bremsing kan redusere et togs totale energibehov mellom 5 og 20 % [54].

³⁰Antall aksler på et lokomotiv har ingen eller minimal innflytelse på friksjon. Ved å legge til flere aksler, blir vekten spredd utover disse, slik at friksjonskraften forblir den samme. Det er riktignok tilfellet at tyngre lokomotiver gjerne utstyres med flere aksler, og derfor er det en tilsynelatende korrelasjon mellom antall aksler og trekkraft blant lokomotiver.



Figur 43: Boggivogn Rps, som brukes som standardplattform for batterier, hydrogen og brenselceller. Denne vognen er utvalgt fordi den har høyest lastkapasitet i forhold til lengden, altså 57 t per 20,74 m.

IIb.1.3 Lokomotiv med biodiesel

Bruk av biodiesel innebærer ingen betydelige tekniske endringer til lokomotivet fra dagens vanlig diesel, og vil derfor ikke omtales i energiberegningene; beregningene for diesel vil gjelde også for biodiesel.

IIb.1.4 Lokomotiv med flytende naturgass

Teknologien for naturgass vil også være ganske lik den for diesel og ha lignende egenskaper (energipris, virkningsgrad, o.l.), og dessuten kreve mindre justeringer. Da flytende naturgass har litt over halvparten av energitetthet til diesel, vil rekkevidden kunne være mindre for ombygde lokomotiver. Spesialbygde naturgasslokomotiver vil trolig ha større tank for å kompensere den lavere energitettheten. Med samme tankstørrelse som CD 312, som er oppgitt til å være 7 m³ av produsenten, kan det lagres omtrent 40 MWh, som da vil reduseres avhengig av motorens virkningsgrad til omtrent 20 MWh.

Det antas at naturgasslokomotiver, som etter hvert kommer på markedet, vil ha lignende egenskaper som dagens diesellokomotiv CD 312, og dermed ikke innebære endringer fra energiberegningene for diesel.

Forbrenning av naturgass i lokomotivet vil også produsere utslipp, riktignok i mindre mengder enn for diesel (på energibasis).

IIb.1.5 Kontaktledning (KL)

For tilfeller der det blir oppført kontaktledning langs en ikke elektrifisert bane, antas det at CD 312-lokomotivet blir erstattet av en CE 119, som gir lettere vekt av lokomotivet og (følgelig) noe mindre trekkraft ved lave hastigheter; ellers er referansegodstoget uendret.

Kontaktledning er kjent for å være et dyrt alternativ på grunn av de store investeringskostnadene, spesielt sett i sammenheng med vedlikeholdskostnadene og utfordringene knyttet til pålitelighet av kontaktledning i værutsatte og vanskelig tilgjengelige områder. Kontaktledning lønner seg når det er mange tog som bruker samme strekning.

IIb.1.6 Batterier

Batterier er som kjent tunge i forhold til lagret energi, og vil måtte transporteres over lange avstander sammen med toget. Togets totale lengde må ikke overskride 600 m, som er standard krysningssporlengde. Det er derfor viktig å velge ut den vognen som har størst lastekapasitet per forbrukt meter; det velges derfor en plattformvogn med boggi (Rps, litrakode 393 3), med maksimal lastekapasitet på 57 t og en lengde på 20,74 m. Vognen har forøvrig en egenvekt på 23 t [52], og er vist i figur 43.

Det antas en energikapasitet for Li-ion batterisystemer på 100 Wh/kg [55], som er realistisk selv om det er noe høyere enn umiddelbart kommersielt tilgjengelige løsninger (60 Wh/kg). Dette betyr at hver batterivogn, fulladet med Li-ion-batterier, har en total kapasitet på 5,7 MWh. Batterisystemer har en volumetrisk energitetthet på 0,2 MWh/m³ [55], som betyr at batterisystemet vil oppta 28,5 m³: dette er mindre enn volumet til en standard 20 fots container.

Hvis energibehovet skulle kreve et for stort antall batterivogner, er det et alternativ å bruke en brøkdel av batteriene og heller lade disse underveis. Dette kan realiseres ved at man stopper toget et sted, for eksempel på en stasjon eller holdeplass, hvor det er installert en kontaktledning og bruker dette til batterilading; ulempen er at man må vente cirka en time til batteriene er fulladet før man kan reise videre. Denne hurtigladingen bør foregå et sted der nettet har kapasitet for minst 5 MW per batterivogn, slik at batteriet kan hurtiglades på omtrent én time. Denne hurtigladingen bør ikke by på spesielle utfordringer ellers, da denne effekten er mindre enn den som et CE 119-lokomotiv forbruker, nemlig 5,58 MW.

Et alternativ til som ikke krever full batteripakke er å installere kontaktledning over en strekning som tar toget cirka en time å kjøre, og bruke dette til å lade batteriene under kjøring; ulempen er i dette tilfellet at det må investeres i en lengre kontaktledning, omtrent 80 km.

IIb.1.7 Brenselceller

Hydrogenet kan ikke mates direkte i CE 119-lokomotivet³¹, og disse vil måtte finne plass på en egen vogn der omvandlingen fra hydrogen til elektrisitet vil foregå.

Brenselceller dimensjoneres etter effekt: effekttetthet for PEM-brenselceller er omtrent 370 kW/t på massebasis og 230 kW/m³ på volumbasis. For å levere CE 119s nominelle effekt, altså 5,58 MW, behøver man 15 t og 25 m³; dette er godt innenfor volumet som er tilgjengelig i en standard 20 fots kontainer (33,2 m³).

Den gjenværende lastekapasiteten på vognen, 42 t, kan da brukes til hydrogenlagring.

IIb.1.8 Hydrogenlagring

Det finnes flere løsninger for hydrogenlagring: trykksatt gass ved høye trykk, flytende ved kryogeniske temperaturer, eller adsorbent i metallhydrider. I transportsektoren er utviklingen de senere årene gått mot trykksatt hydrogen, med standardtrykk 35 MPa for busser og 70 MPa for biler³².

70 MPa er best på personbiler, der det er viktig å minimere volumet, men kompresjonskostnadene er høyere enn for 35 MPa. Til lagring i togvogner virker derfor 35 MPa rimeligere, da vekt er en viktigere faktor enn volum. Hydrogenet vil måtte lagres i flere mindre tanker istedenfor en enkelt stor tank, på grunn av gjeldende regelverk om transport av gass under trykk. Andre løsninger er ikke like fullt utviklet, og er sett bort fra i denne analysen.

Energitettheten til rent hydrogen er over 32 kWh/kg; denne totale energien utvannes riktignok ved at brenselceller har ca. 50 % virkningsgrad, og ved at hydrogenet typisk utgjør kun 10 % av vekten til trykktanken som inneholder det: energitettheten i praksis reduseres derfor til 1600 Wh/kg.

En ren hydrogenvogn, bygd på en plattformvogn med boggi med lastekapasitet 57 t, vil derfor ha potensialet til å lagre over 91 MWh; hvis vi tar hensyn til lastekapasiteten som er igjen på en brenselcellevogn, altså 42 t, er potensialet 67 MWh.

Hydrogen er riktignok lett, men tar opp mye plass på grunn av sin lave tetthet. For en hydrogentrykktank ved 35 MPa er hydrogenets energitetthet på volumbasis 0,85 MWh/m³. Da brenselcellene antas å ha en virkningsgrad på cirka 50 %; for de 91 MWh angitt ovenfor skal det altså lagres brutto 182 MWh, for et volum på 214 m³, som spredt utover plattformvognens 19,5 m i gulvlengde gir et tverrsnitt på 11 m², som er innenfor tverrsnittet til GC-togprofilen. Den samme beregningen for en vogn med brenselceller og hydrogenlagring, med 67 MWh netto hydrogenenergi, gir 158 m³ for hydrogen, som blir til 183 m³ sammen med brenselcellene.

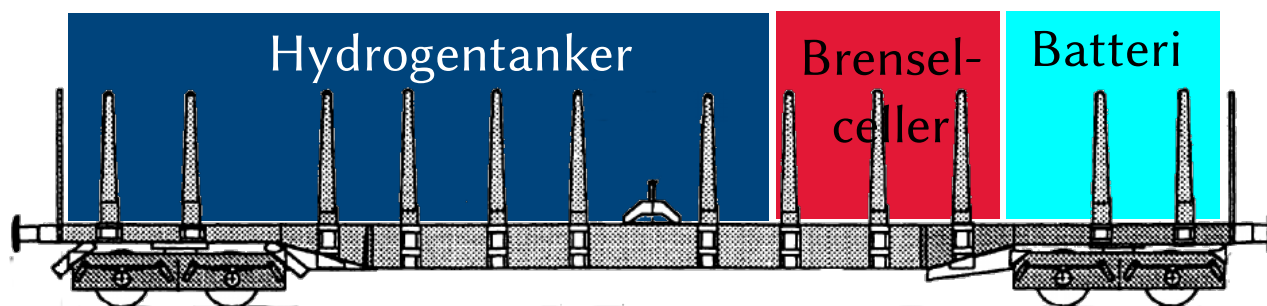
IIb.1.9 Hybrid med hydrogen og batteri

Under kjøring yter lokomotivet normalt ikke sin fulle effekt; denne brukes kun i kortere perioder (oppoverbakker, akselerasjon).

Brenselcellene, som i forrige avsnitt ble dimensjonert etter lokomotivets makseffekt, kunne dimensjoneres mye mindre ved å hybridisere systemet med et bufferbatteri som kan bistå brenselcellene ved høy effekt, og lades opp igjen med overskudd fra brenselcellene når toget har lavere effektbehov.

³¹Vi ser bort fra et eventuelt modifisert lokomotiv med integrerte brenselceller, selv om det kan bli aktuelt i fremtiden.

³²Hydrogen ved 35 MPa inneholder faktisk 2/3 av hydrogenet som kan lagres ved 70 MPa på grunn av fysiske ulineæriteter.



Figur 44: Skjematisk representasjon av en hybrid vogn med hydrogenlagring, brenselceller og bufferbatteri.

Brenselcellene er en kostbar del av systemet, så en slik hybridisering vil redusere investeringene; dessuten har brenselceller som yter en konstant last mye lengre levetid enn de som varierer lasten hele tiden.

Batteriet vil også muliggjøre regenerativ bremsing og dermed redusere energiforbruket ytterligere i en hybrid konfigurasjon er det plass til alle komponentene (hydrogentanker, brenselceller og batterier) på en vogn, f.eks. som vist skjematisk i 44.

IIb.1.10 Hydrogenproduksjon fra fornybare energikilder

Det er ikke aktuelt å kjøpe hydrogen fra gasselskaper, da disse ikke leverer i de kvanta som ville være nødvendig for togtransport, og uansett ikke til priser som kan være konkurransedyktige mot f.eks. diesel. Dette er fordi gasselskapene oftest leverer mindre kvanta til laboratorier og industri, og en betydelig del av prisen er flasketransport til kunden. Det forutsettes derfor at Jernbaneverket vil produsere sitt eget hydrogen.

Hydrogen er en flyktig gass som kan fremstilles på mange måter. Den billigste måten er reformering av naturgass, som er den dominerende prosessen verden over: store mengder hydrogen produseres i verdens raffinerier, mest til internt forbruk. Da Norge ikke besitter et distribusjonsnett for naturgass, er hydrogen fra reformering dyrere enn i andre land fordi man må betale gasselskapene relativt mye for flasketransporten. I land med naturgassnett, settes det gjerne opp hydrogenstasjoner basert på små reformere, men i Norge er elektrolyse mer aktuelt.

Elektrolyse er en elektrokjemisk prosess idet man spalter vann i hydrogen og oksygen ved tilførsel av strøm. Prosessen genererer ingen utslipp, men er mer energikrevende enn reformering av naturgass. Elektrolysører er stille enheter, men det er ofte nødvendig å øke trykket til det produserte hydrogenet ved en stempelkompressor, som kan lage litt støy; det finnes imidlertid høytrykkselektrolysører som kan generere hydrogen allerede ved trykk som egner seg til transport.

Det vil antas i denne rapporten at all hydrogenproduksjon foregår ved elektrolyse, slik det er for eksempel på Gaustad hydrogenstasjon i Oslo, avbildet i figur 45. Det legges videre til grunn at all strøm kommer fra fornybare energikilder.

IIb.2 Energianalyse

Per i dag er det fire lange ikke-elektrifiserte strekninger i det norske Jernbanenettet:

- Nordlandsbanen fra Bodø til Trondheim;
- Rørosbanen fra Støren til Hamar;
- Solørbanen fra Elverum til Kongsvinger;
- Raumabanen fra Åndalsnes til Dombås.

I dette avsnittet vil potensialet for (del-)elektrifisering av disse analyseres etter et felles mønster; kommentarer vil tilføyes hver bane avhengig av særtrekkene for denne.



Figur 45: Hydrogenstasjonen på Gaustad, Oslo. Den fremstiller hydrogen ved elektrolyse fra strøm og vann, og leverer hydrogen ved 700 bar.

IIb.2.1 Interaksjon med eksisterende teknologi

Alle de analyserte alternative løsninger (KL, batteri, hydrogen, hybrid) antar at det taes i bruk et elektrisk lokomotiv. Med unntak av KL, baserer alle løsningene seg på produksjon av DC-strøm, ikke AC som er standard i det norske KL-nettet.

Det antas derfor at diesel-lokomotivene i så fall vil bli erstattet av et kombinert lokomotiv slik som Bombardier TRAXX MS, som kan bruke både AC og DC [53]. CargoNet opererer i dag med TRAXX AC-modellen, kjent som CE 119.

At lokomotivet kan bruke både AC fra kontaktledning og DC fra batteri eller brenselceller gir stor fleksibilitet i bruk, da toget vil kunne bruke hele det norske jernbanenetnet. I tillegg vil det være mulig å lade batteriene mens toget er tilkoblet KL, slik at toget ikke behøver stanse for lading.

Dette betyr at alle analysene vil utføres kun for delen av strekningen som ikke har kontaktledning. Rørosbanen regnes derfor ikke fra Trondheim til Oslo, men fra Støren til Hamar, fordi både nord for Støren og sør for Hamar kan toget bruke energi fra kontaktledningen.

IIb.2.2 Analysemetode

Data for alle strekningene ble levert av Jernbaneverket som en XML-fil i railML-format; fra dette ble følgende data hentet for de relevante sporene:

- stigning i ‰;
- fartsgrenser (nordover og sørover);
- navn på stasjoner og holdeplasser;
- tunneler.

Derfra er det mulig å beregne en høydeprofil ved å integrere stigningen over trasélengden. Noen mindre feil vil forekomme da stigningen er gitt kun i hele promille; for å verifisere resultatet festes høyden til startpunkt, og høyden til endepunkt sammenlignes med den virkelige.

Fartsgrensen er inndelt i tre klasser, Normal, Pluss og Krenge. For referansegodstoget brukes Normal som referanse, i tillegg til togets egen fartsgrense på 90 km/h. For enkelhets skyld antas at toget holder fartsgrensen til enhver tid, og det modelleres ikke akselerasjon, bremsing eller ventetid på stasjon.

Avhengig av togets vekt, lengde og hastighet beregnes trekraften. En grundig innføring i kreftene som påvirker et tog presenteres av Spiess [56], mens mer praktisk anlagte formler for spesifikke togkonfigurasjoner ble samlet av Lindgreen and Sorenson [57].

De dominerende kreftene som må modelleres for å estimere trekraften til et tog er stignings-, rulle- og luftmotstand [57]. Det antas at referansegodstoget er tett lastet med containere, og det benyttes formlene for et tog med fullastede Sgis-vogner (3 containere og 4 aksler på hver vogn).

Stigningsmotstand er komponenten til tyngdekraften som bremser eller akselererer toget; den beregnes enkelt som $\alpha_{\%o} m g$.

Rullemotstand er svakt avhengig av hastigheten v , og beregnes som:

$$A = 343 + 195 \times 4 n \quad [\text{N}] \quad (1)$$

$$B = 15,14 + 1,62 L \quad [\text{N s/m}] \quad (2)$$

$$R_{\text{rulle}} = A + B v \quad (3)$$

hvor n er antall vogner og L togets lengde.

Luftmotstand finnes fra:

$$c_L A_{\text{Norm}} = 8,67 + 11,10 \cdot 10^{-2} L \quad (4)$$

$$R_{\text{luft}} = \frac{\rho}{2} c_L A_{\text{Norm}} v^2 \quad (5)$$

hvor ρ er lufttettheten.

Andre mindre krefter er *ikke* medregnet i modellen og neglisjeres: svingemotstand, sporvekselmotstand, dynamisk, lager- og girmotstand, oppstartmotstand, luftmotstand ved forskjellige vindforhold, tunnelinnang, og bremseskiver.

Energiforbruket beregnes ved å multiplisere trekraften med strekningslengden, og så legge til et ledd for endring i kinetisk energi (akselerasjon):

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} m R \Delta (v^2) \quad (6)$$

hvor R er roterendemassefaktoren, antatt lik 1,06.

Energibehovet ΔE for en strekning med lengde Δx er altså:

$$\Delta E = (R_{\text{rulle}} + R_{\text{luft}} + \alpha_{\%o} m g) \Delta x + \Delta E_k \quad (7)$$

Det totale energiforbruket er summen av alle ΔE over alle n strekninger:

$$E(n) = \sum_{i=1}^n \Delta E_i \quad (8)$$

For å simulere regenerativ bremsing, som kan foregå kun når $\Delta E < 0$, multipliseres alle negative ΔE med antatt virkningsgrad for regenerativ bremsing, altså 50%. Er regenerativ bremsing ikke mulig for et spesifikt alternativ, settes virkningsgraden til 0.

IIb.2.2.1 Grunn- og bufferlast

Som nevnt i avsnitt IIb.1.9, et lokomotivs maksimale effekt typisk mye større enn den gjennomsnittlige. Det er da mulig å dele energiproduksjonen i to deler:

1. En konstant effektproduksjon som tilsvarer den gjennomsnittlige effekten;
2. En batteribuffer som lagrer overskudd og kompenserer for underskudd gjennom traséen.

Dette er spesielt relevant for hydrogentog, fordi det tillater å dimensjonere brenselcellene etter en mye mindre effekt enn lokomotivets nominelle; i tillegg gir batteriene mulighet til å utnytte regenerativ bremsing.

Siden brenselcellene er en kostbar del av systemet, er det økonomisk gunstig å erstatte en del av deres effektkapasitet med batterier³³. Det er også viktig å bemerke at levetiden til brenselceller økes betraktelig hvis de ikke utsettes for varierende last, men benyttes som en kontinuerlig grunnlast.

Gjennomsnittlig effekt regnes ut som forholdet mellom totalt energibehov og kjøretid:

$$\bar{P} = \frac{E(n)}{t(n)} = \frac{\sum \Delta E_i}{\sum v_i / \Delta x_i} \quad (9)$$

Grunnlasten ΔE_g og bufferlasten ΔE_b defineres da som:

$$\Delta E_{g,i} = \bar{P} \Delta t_i \quad (10)$$

$$\Delta E_{b,i} = \Delta E_{g,i} - \Delta E_i \quad (11)$$

hvor i betegner strekningen.

Energien som da til enhver tid er lagret i batteriene beregnes som:

$$E_{b,i}(n) = \sum_{i=1}^n \Delta E_{b,i} - \min_i E_{b,i} \quad (12)$$

Det siste leddet, $-\min_i E_{b,i}$, skal sikre at bufferens minimumsverdi er nøyaktig 0³⁴; den nødvendige bufferbatterikapasiteten er da $\max_i E_{b,i}$.

IIb.2.2.2 Energiforbruk i NSB-miljøregnskapet

Det er god overensstemmelse mellom energiforbrukstallene i dette dokumentet og data publisert i NSB-konsernets miljøregnskap [4] for dieseldrevne godstog.

Det gjøres oppmerksom på at NSB rapporterer data som MWh energiinnhold i diesel, som kan omvandles til mekanisk energi med en virkningsgrad på cirka 40 %, og at de regner kun med tonn *nyttelast*, ikke togets totale vekt³⁵; derfor kan det se ut som at det er et stort sprik mellom NSBs tall (for 2011, 119 Wh/t km) og resultatene i denne rapporten (rundt 23 Wh/t km).

IIb.2.3 Nordlandsbanen

Nordlandsbanen er en 730 km lang enkeltsporet, ikke elektrifisert jernbanestrekning fra Trondheim Sentralstasjon til Bodø. Strekningen Trondheim-Steinkjer er også kjent som Trønderbanen.

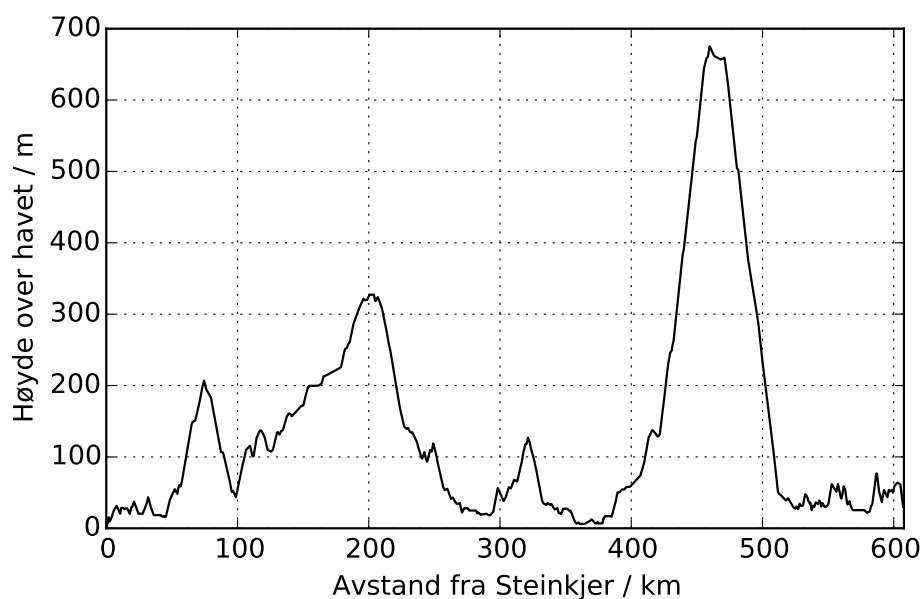
Det er allerede bestemt at den første delen i Nordlandsbanen, strekningen fra Trondheim til Steinkjer, skal elektrifiseres, og det er vedtatt en startbevilgning [11]. Analysen vil derfor begrenses til den ikke-elektrifiserte, 600 km lange strekningen mellom Steinkjer og Bodø.

Høydeprofilen beregnet utifra stigningen er presentert i figur 46. Steinkjer er satt til sin eksakte høyde (3,6 m), mens den beregnede høyden for Bodø avviker noe fra den riktige verdien (47,4 m istedenfor 2,9 m). Avviket er ikke vesentlig for resultatene.

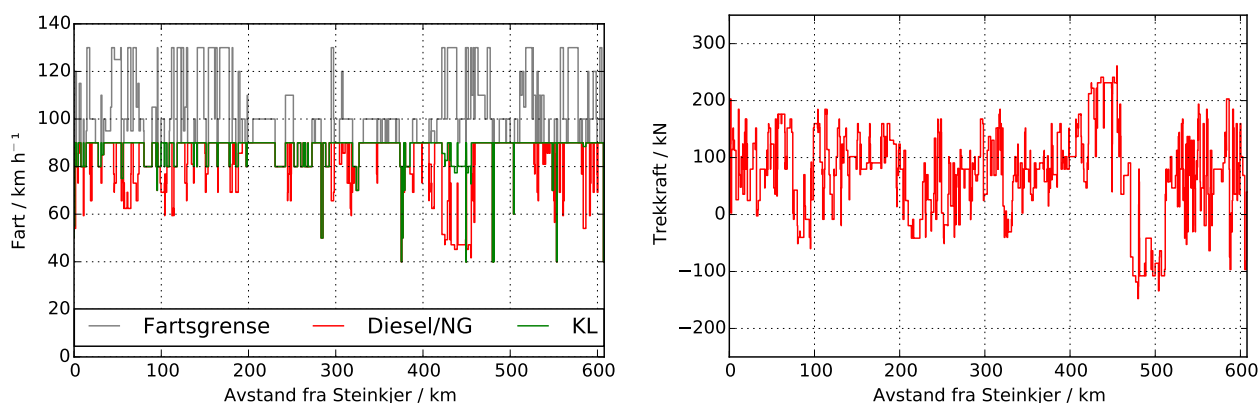
³³Batterier er riktignok dyre per *energienhet* (kWh), men billige per *effektenhet* (kW).

³⁴I praksis er det uønskelig at batteriet skal lades helt ut, og dette skal derfor overdimensjoneres noe.

³⁵Ifølge Thune-Larsen, Madslie, and Lindjord, er forholdet mellom totalvekt og nyttelast cirka 3 [5, tabell 3.3].



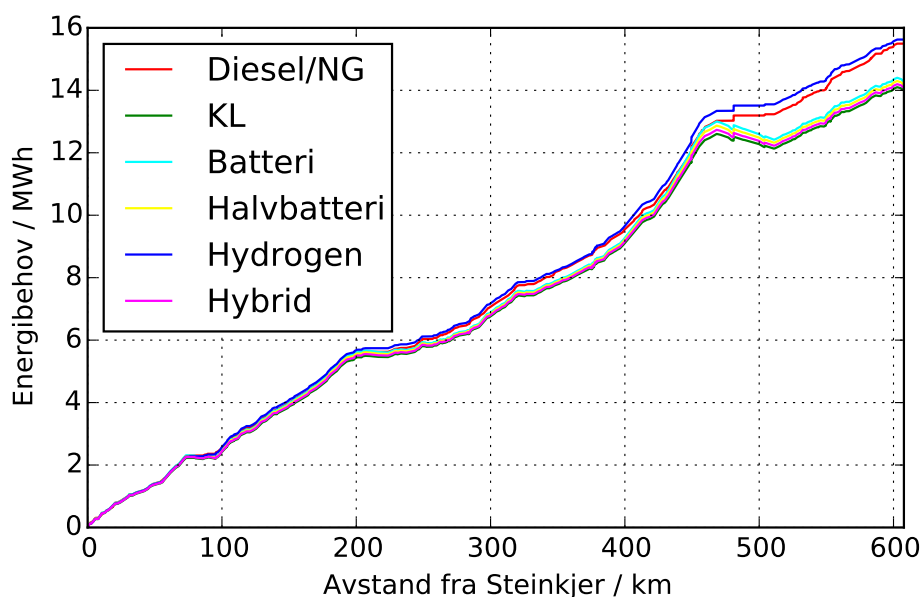
**Figur 46: Høydeprofil for Nordlandsbanen mellom Steinkjer (0) og Bodø (608). Andre relevante stasjoner er Maja-
vatn (198), Mosjøen (283), Mo i Rana (376), Lønsdal på Saltfjellet (480).**



(a) Fartsgrense og hastigheter

(b) Trekraft

Figur 47: Nominelle hastigheter og trekraft for referansegodstoget på vei fra Steinkjer til Bodø. Hastighetene er vesentlig forskjellige mellom diesel og elektrisk lokomotiv, mens trekraften er omtrent det samme (diesel er plottet).



Figur 48: Energiforbruk for referansegodstoget fra Steinkjer til Bodø med forskjellige framdriftsteknologier.

Fartsgrense og faktisk hastighet for diesel- og elektriske lokomotiver med referansetoget er fremvist i figur 47a; for det elektriske CE 119 er tilfellet med kontaktledning brukt, men alle tilfeller (batteri, hydrogen osv.) er omtrent like.

Flere steder er begrensningene i effektuttak for diesellokomotivet synlige ved at den ikke kan holde maksimalfarten, mens det elektriske lokomotivet klarer seg gjennomgående bedre. Dette gjenspeiler seg i de reisetidene som blir beregnet utifra dette: 7:37 for diesel og 7:01 for elektrisk lokomotiv.

Forskjellen er spesielt synlig på vei opp Saltfjellet, der dieseldrevne CD 312 må senke farten til under 50 km/h³⁶ (se figur 47a ved km 420–450), mens CE 119 kan holde 80 km/h. Fartsprofilen på vei sørover er ikke nevneverdig forskjellig.

Trekraften for referansetoget er ikke veldig forskjellig for alternativene; grafen for diesel på vei nordover presenteres i figur 47b, hvor trekraften kommer opp i 250 kN. Dette er nær grensen for CE 119, som har en starttrekkraft på 300 kN, og kunne være problematisk i tilfellet isdannelse på skinnene. Grafen for trekraften sørover inneholder forøvrig ingen overraskelser.

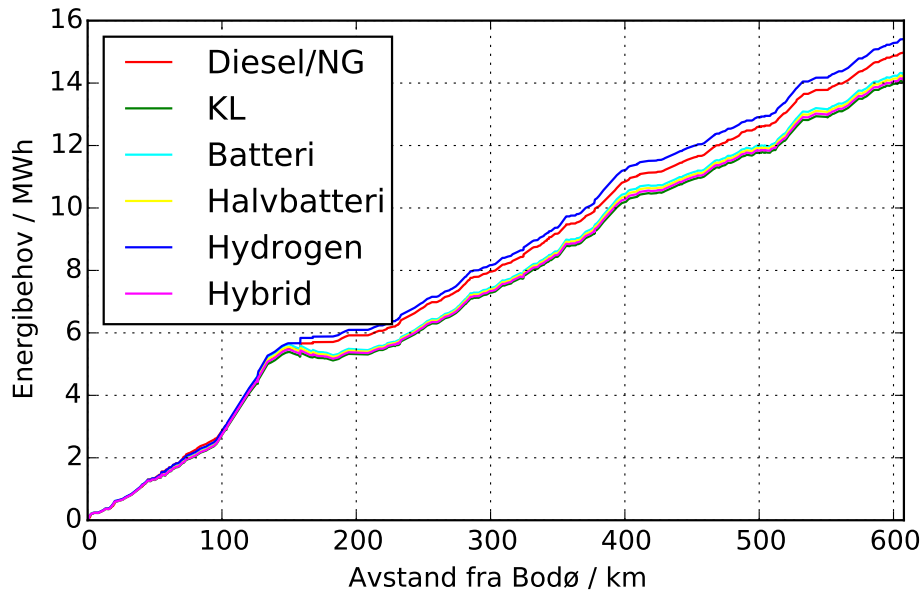
Energiforbruket er vist i figurer 48 og 49 for forskjellige teknologiske løsninger, henholdsvis for reisen nordover og sørover. Energiprofilene står omtrent sammen fram til toppen av Saltfjellet, og deler seg deretter i to grupper: teknologiene med og uten regenerativ bremsing (diesel og hydrogen er uten, alle andre med). Det er ellers ingen store forskjeller, og energibehovet er omtrent 15 MWh begge veier; regenerativ bremsing gir mulighet til å gjenvinne cirka 1 MWh på vei ned fra Saltfjellet.

Regenerativ bremsing kan senke energibehovet med cirka 10 %, begge veier. Batterienes ladestatus er plottet i figur 50: batteriene krever mest lagringskapasitet på vei ned fra Saltfjellet i retning nord (omtrent ved km 500), hvor det er potensial til å lagre 0,6 MWh, men ellers i traséen er det mye mindre lagringsbehov (under 50 kWh).

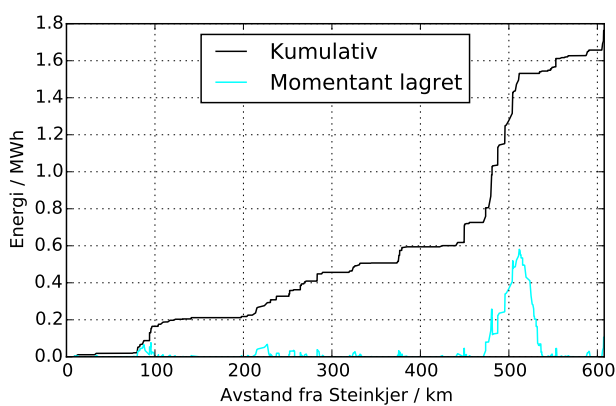
Likevel brukes batteriene ofte, og den regenererte energien utenom Saltfjellet hopper seg opp til halvparten av all regenerert energi langs strekningen (svart linje i figur 50). Denne delen av traséen bidrar altså med halvparten av gjenvunnet energi, men krever kun en tiendedel av lagringsbehovet.

For et hydrogentog med bufferbatteri, er den gjennomsnittlige effekt over Nordlandsbanen 2 MW. Som vist i figur 51, er den nødvendige kapasiteten for bufferbatteriet litt i overkant av 2 MWh. Dette batteriet vil legge beslag på 20 t lastekapasitet på hydrogenvognen, som da vil måtte redusere hydrogenlagringskapasiteten til 46 MWh (se tabell 20). Med denne energimengde kan toget lett kjøre Steinkjer-Bodø og retur: det er dermed

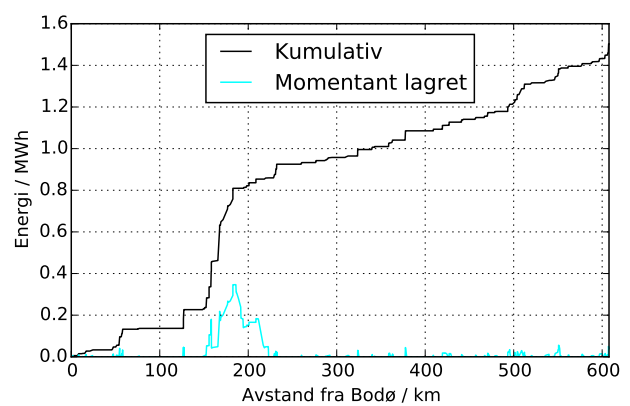
³⁶Dette tallet ble bekreftet av Jernbaneverket.



Figur 49: Energiforbruk for referansegodstoget fra Bodø til Steinkjer med forskjellige framdriftsteknologier.

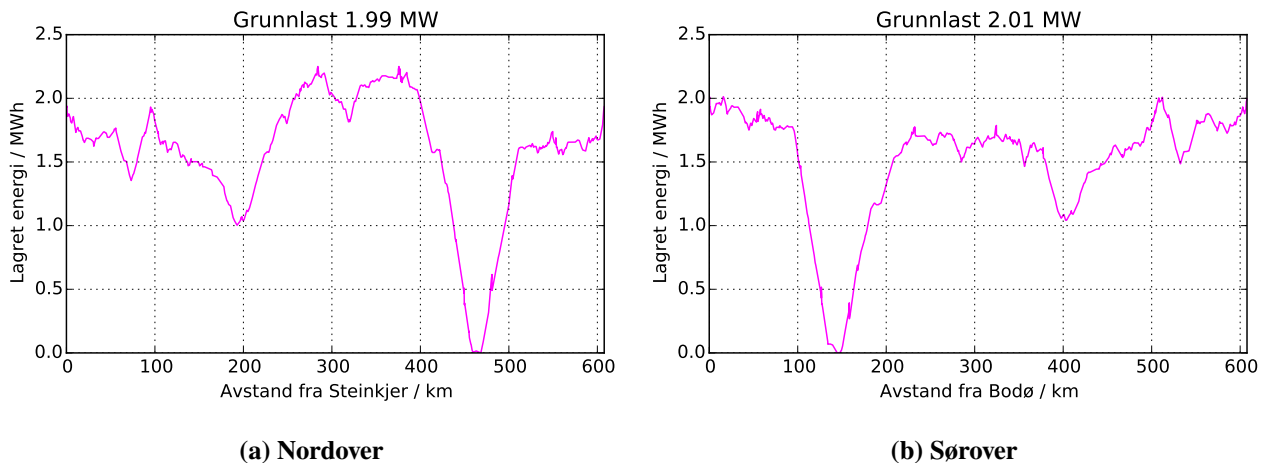


(a) Nordover



(b) Sørøver

Figur 50: Regenerert energi for referansegodstoget over Nordlandsbanen.



Figur 51: Lading og utlading av et bufferbatteri for en brenselcelle dimensjonert for å levere den gjennomsnittlige effektbehovet over Nordlandsbanen.

ikke nødvendig med flere hydrogenstasjoner. Den ene kan med fordel plasseres ved Trondheim Sentralstasjon.

IIb.2.4 Rørosbanen

Rørosbanen er en alternativ bane til den elektrifiserte Dovrebanen mellom Støren i nord og Hamar i sør, 381 km lang. Rørosbanen fungerer gjerne som reserveløsning for transport av gods og passasjerer mellom Trondheim og Oslo når Dovrebanen er utilgjengelig, for eksempel på grunn av ras.

Høydeprofilen er presentert i figur 52. Det er ikke en stor høydeforskjell mellom endestasjonene, men det er en mye brattere stigning fra Støren til Røros enn ellers langs jernbanen som vil kreve større trekraft over lengre tid.

Fartsgrensene og hastighetene til elektrisk og dieseltog er plottet i figur 53. Elektriske tog vil kunne være raskere på vei fra Støren til Røros (selv om den lave fartsgrensen gjør forskjellen liten), og fra Hamar til Elverum. Reisetidene er presentert i tabell 19.

Profilen for trekraften (figur 54) er igjen veldig likt for alle energiformer, men er noe forskjellig på vei nordover og sørover. På strekningen fra Støren til Røros er trekraften høy i lang tid, i underkant av 200 kN, mens den svinger mellom 0 og 100 kN resten av reisen; på vei nordover er det sjelden trekkrefter over 150 kN fram til Røros, og etter det er de under 50 kN.

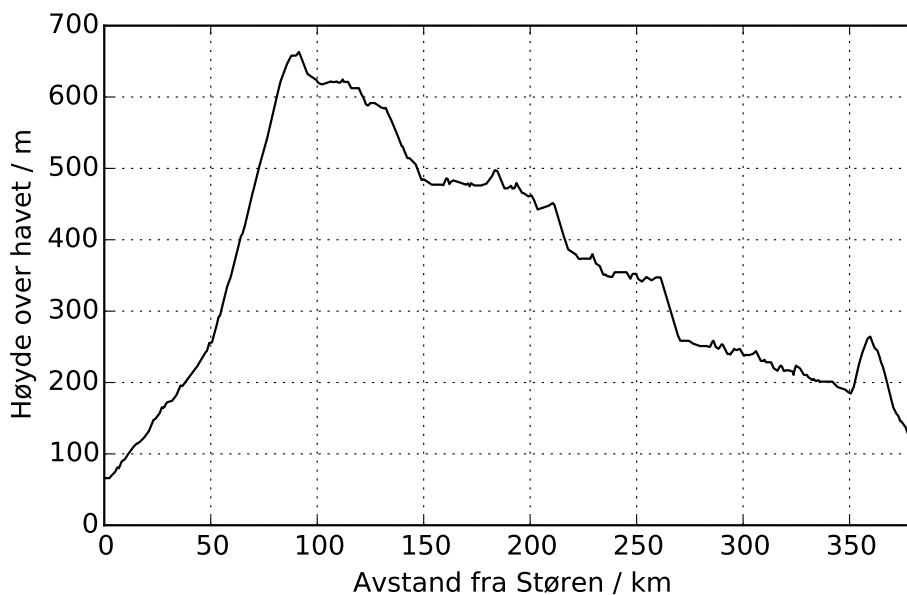
Energiprofilene i figurer 55 og 56 viser at energibehovet mellom Hamar og Støren er cirka 9 MWh begge veier, med mulighet for å redusere det til drøye 8 MWh hvis regenerativ bremsing er tilgjengelig.

Besparselsen på cirka 10 % i energibehov med regenerativ bremsing er konsistent med resultatene for Nordlandsbanen. Batterienes ladestatus er plottet i figur 57: Oftest er togets kjøring jevn og krever lite kapasitet i et eventuelt regenerativt batteri, typisk under 50 kWh. Et unntak er strekningen fra Røros til Støren, som krever 150 kWh på grunn av den lange og bratte nedbakken.

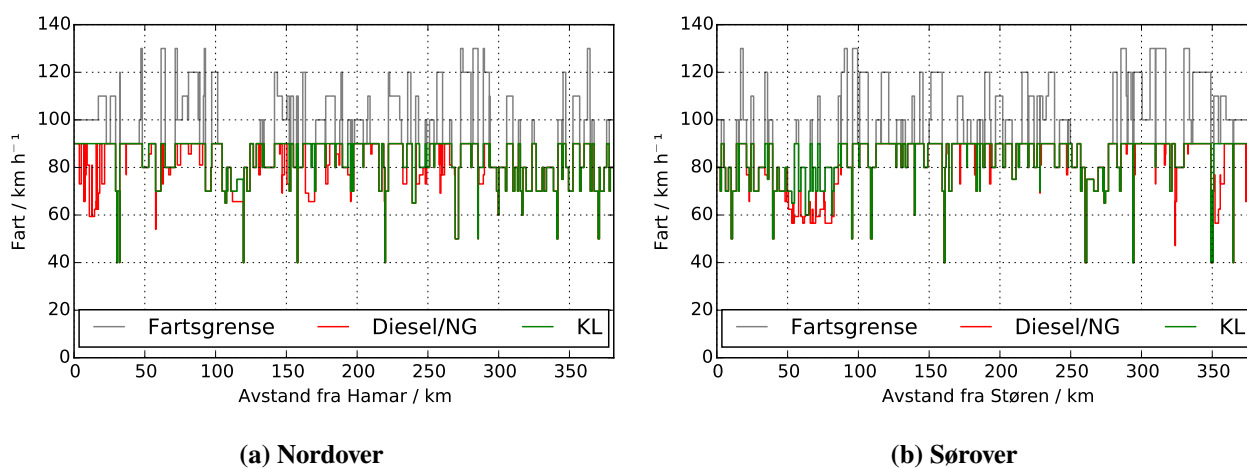
Den gjennomsnittlige effekt over Rørosbanen er like under 1,8 MW. Som vist i figur 58, er den nødvendige kapasiteten for bufferbatterien omtrent 1,8 MWh (mindre for veien sørover, der det gjenvinnes mindre regenerativ bremsing). Bufferbatteriet vil da veie 18 t, og hydrogenlagringskapasiteten vil være 51 MWh (se tabell 20). Det er da mulig å kjøre strekningen seks ganger på én fylling, og det er da ikke nødvendig med flere hydrogenstasjoner; det er mulig å bruke én på Trondheim Sentralstasjon, slik som foreslått for Nordlandsbanen.

IIb.2.5 Røros- og Solørbanen

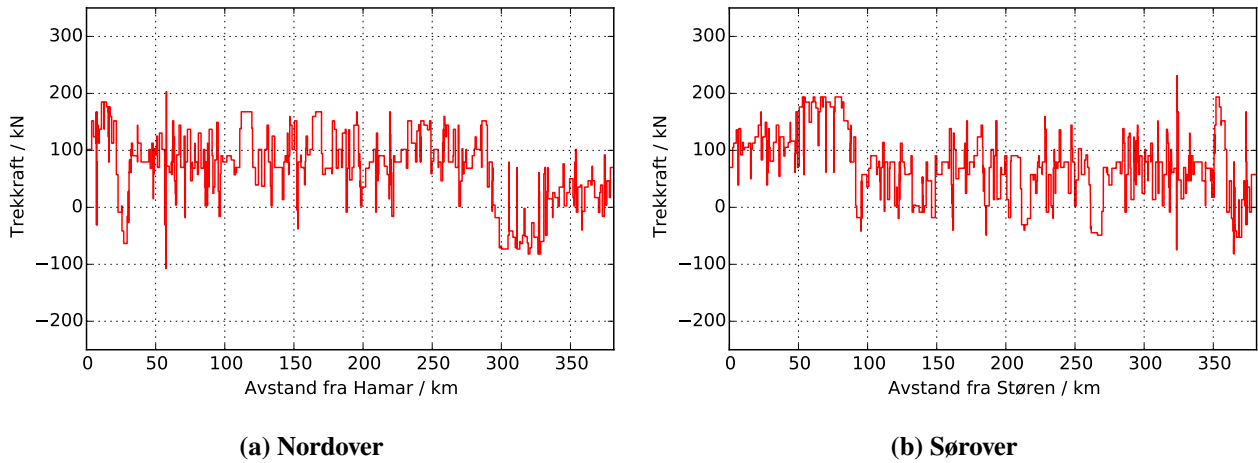
Solørbanen går strengt tatt fra Elverum til Kongsvinger, og det er i dag en 94 km lang ren godsbane. Det er likevel mulighet til å benytte seg av Solørbanen for å kjøre tog fra Trondheim til Oslo utenom den belastede



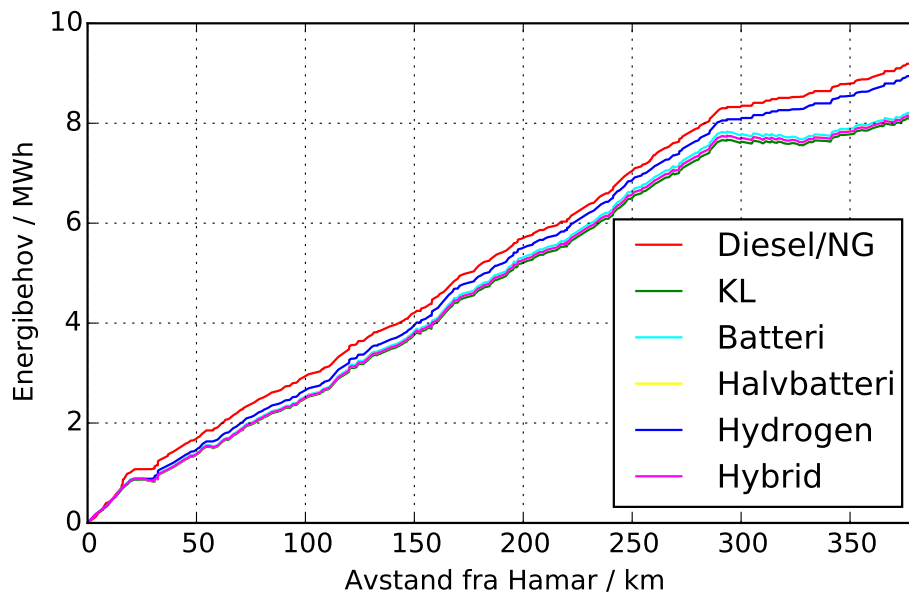
Figur 52: Høydeprofil for Rørosbanen mellom Støren (0) og Hamar (380). Andre relevante stasjoner er Røros (109), Koppang (261) og Elverum (350).



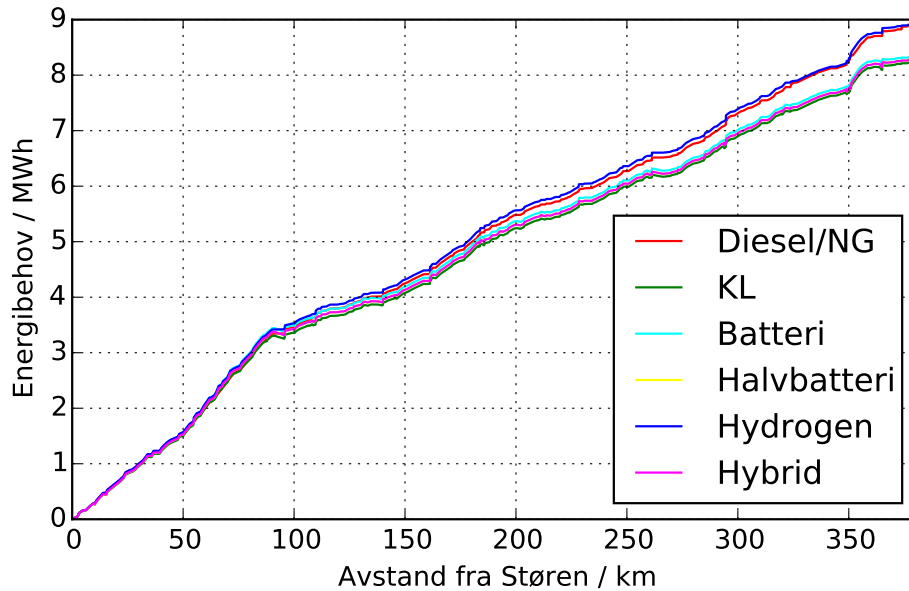
Figur 53: Nominelle hastigheter og referansegodstoget over Rørosbanen.



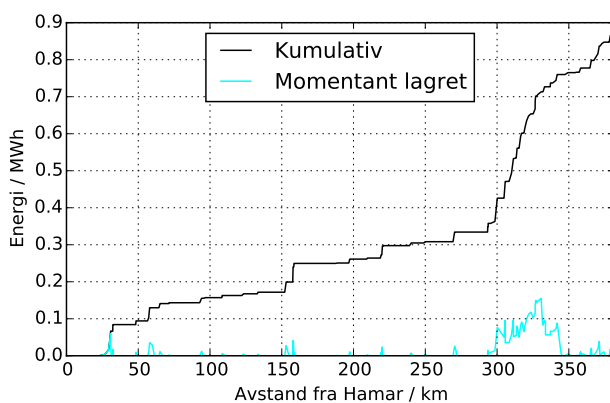
Figur 54: Trekraft for referansegodstoget over Rørosbanen. Profilene for dieseltog er plottet, men alle er omtrent like.



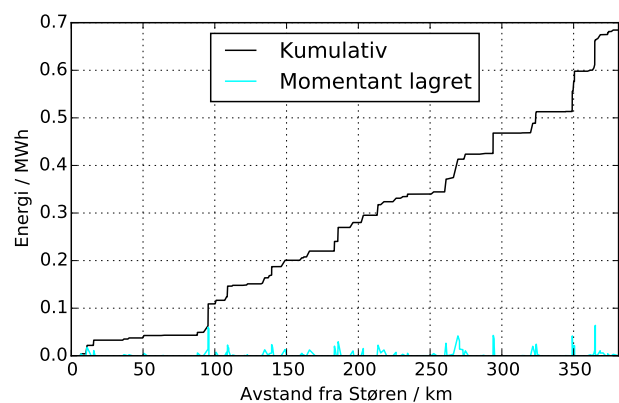
Figur 55: Energiforbruk for referansegodstoget over Rørosbanen fra Hamar til Støren med forskjellige framdriftsteknologier.



Figur 56: Energiforbruk for referansegodstoget over Rørosbanen fra Støren til Hamar med forskjellige framdriftsteknologier.

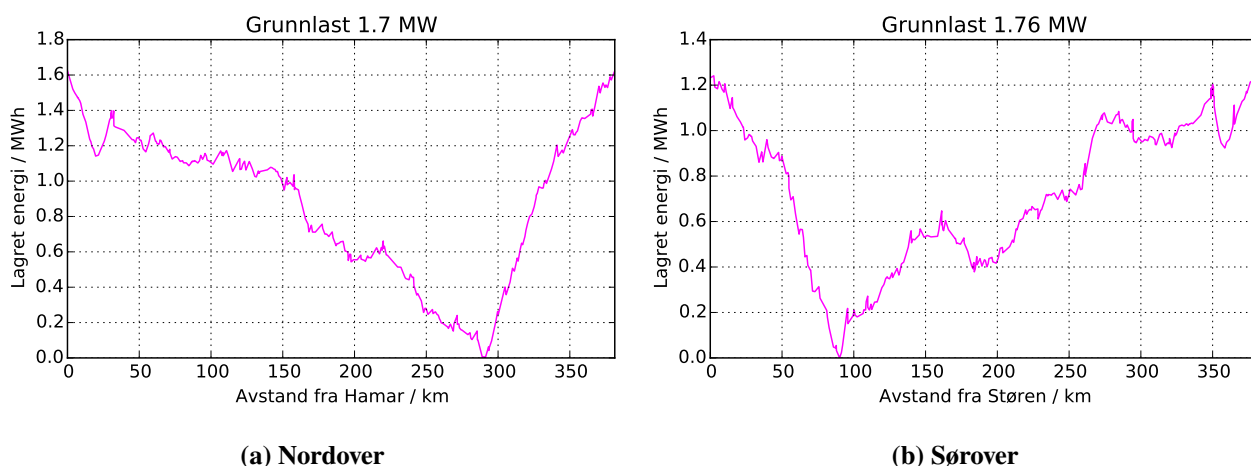


(a) Nordover



(b) Sørøver

Figur 57: Regenerert energi for referansegodstoget over Rørosbanen.



(a) Nordover

(b) Sørøver

Figur 58: Lading og utlading av et bufferbatteri for en brenselcelle dimensjonert for å levere den gjennomsnittlige effektbehovet over Rørosbanen.

strekningen Hamar-Lillestrøm.

Høydeprofilen er presentert i figur 59, og fram til Elverum er den den samme som for Rørosbanen (figur 52). Etter Elverum, er strekningen mot Kongsvinger ganske flat (i motsetning til strekningen Elverum-Hamar).

Energianalysen viser minimale forskjeller fra tilfellet for Rørosbanen.

Hastigheten mellom Elverum og Kongsvinger bestemmes i stor grad av togets egen fartsgrense (90 km/h) i begge retninger, og det er ingen vesentlige forskjeller mellom diesel- eller elektrisk drift.

Trekraften mellom Elverum og Kongsvinger er lite (omtrent 60 kN) i begge retninger.

Energiprofilen ligner også mye på Rørosbanen, men har litt større energibehov på grunn av den lengre strekningen (10,5 MWh, eller 9,5 MWh med regenerativ bremsing), som vist i figurer 60 og 61.

Regenerert energi er nesten helt likt tilfellet for Rørosbanen, da Solørbanen er ganske flat og gir liten mulighet for å hente inn bremseenergi.

Den gjennomsnittlige effekten for et hybrid hydrogen tog med bufferbatteri er også påfallende likt, også når det gjelder den nødvendige batterikapasiteten.

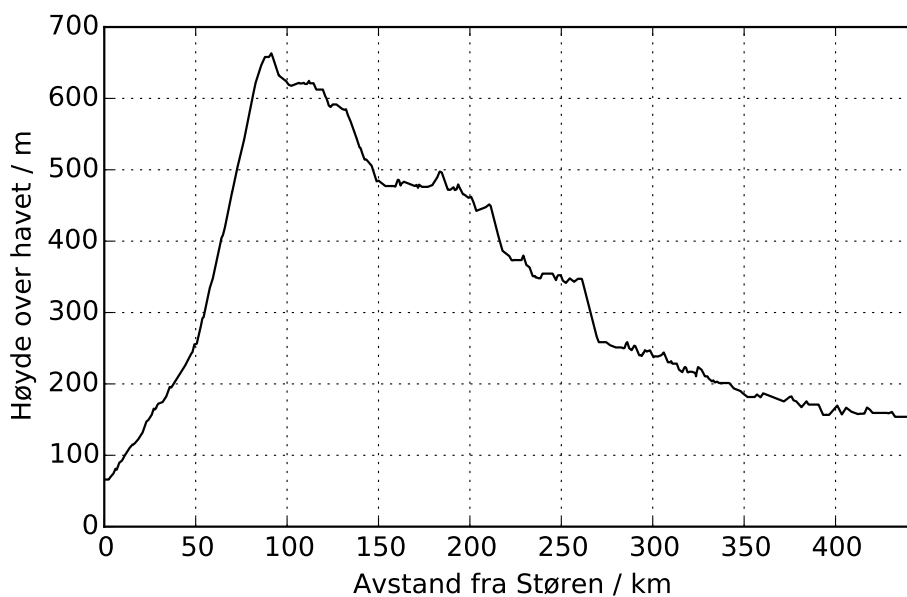
Rørosbanen Støren-Hamar og varianten over Solørbanen Støren-Kongsvinger bør derfor anses som ekvivalente alternativer, med den eneste forskjellen at energibehovet er 1,5 MWh høyere over Solørbanen på grunn av den lengre strekningen.

Dette gjør at et hybrid hydrogen tog med batteribuffer ikke kan kjøre hele strekningen mellom Støren og Kongsvinger seks ganger på én fylling, men kun fem.

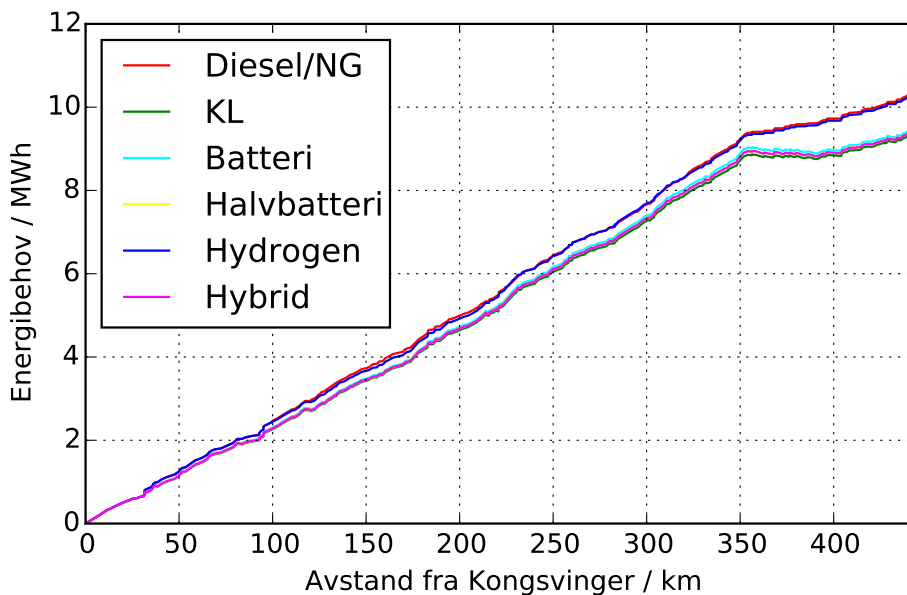
IIb.2.5.1 Tømmertog fra Østerdalen

Et spesielt tilfelle er tømmertog over Solørbanen fra Østerdalen. Disse togene lastes i Østerdalen (Koppang antas som representativt utgangspunkt, selv om det ikke er det eneste) og kjører til Sverige over deler av Rørosbanen og hele Solørbanen; fra Kongsvinger kjører de videre til Sverige via Charlottenberg. Det antas at slike tømmertog har samme konfigurasjon som referansegodstoget.

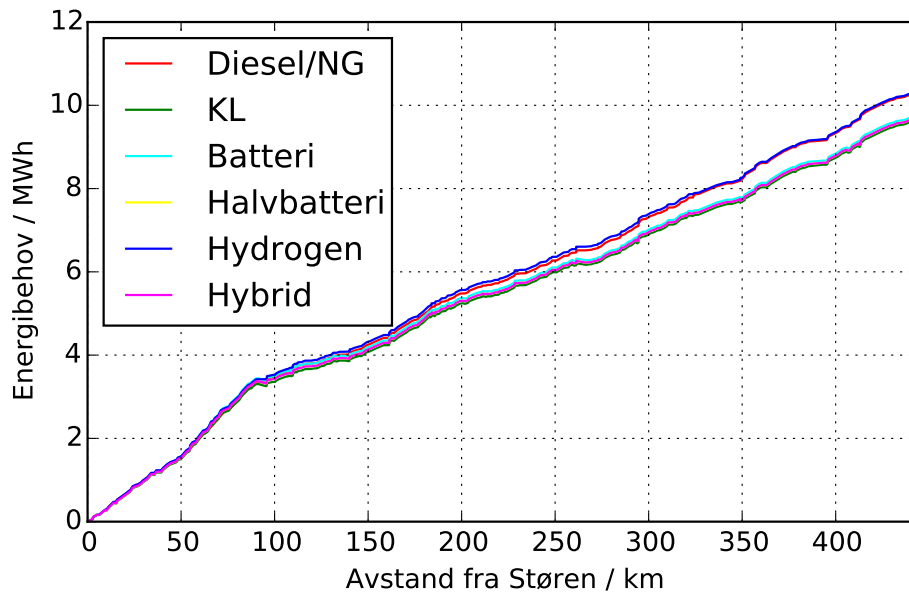
Høydeprofilen er som vist i figur 59 fra km 261 (som tilsvarer Koppang), mens energiprofilen er vist i figur 62. Energibehovet på under 4 MWh kan tilfredsstilles med én batterivogn, men det er ikke sannsynlig at lading vil kunne være mulig i Østerdalen siden endestasjon varierer (Koppang er kun en representativ referanse). To batterivogner vil derfor være nødvendig for en tur-retur reise. Med hydrogen tog vil det ikke være noe problem da lagringskapasiteten er da mye større.



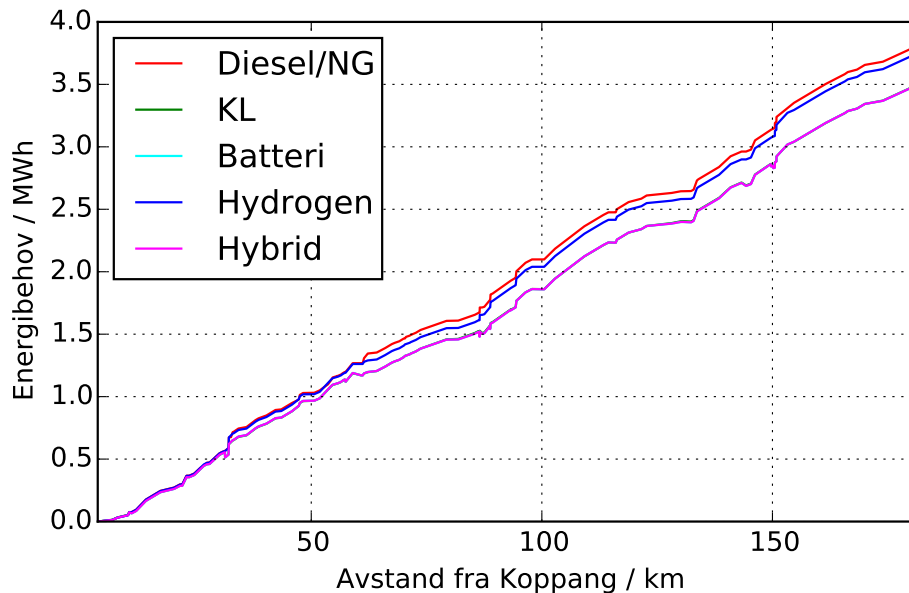
Figur 59: Høydeprofil for Røros- og Solørbanen mellom Støren (0) og Kongsvinger (444). Andre relevante stasjoner er Røros (109), Koppang (261), Elverum (350) og Braskereidfoss (375).



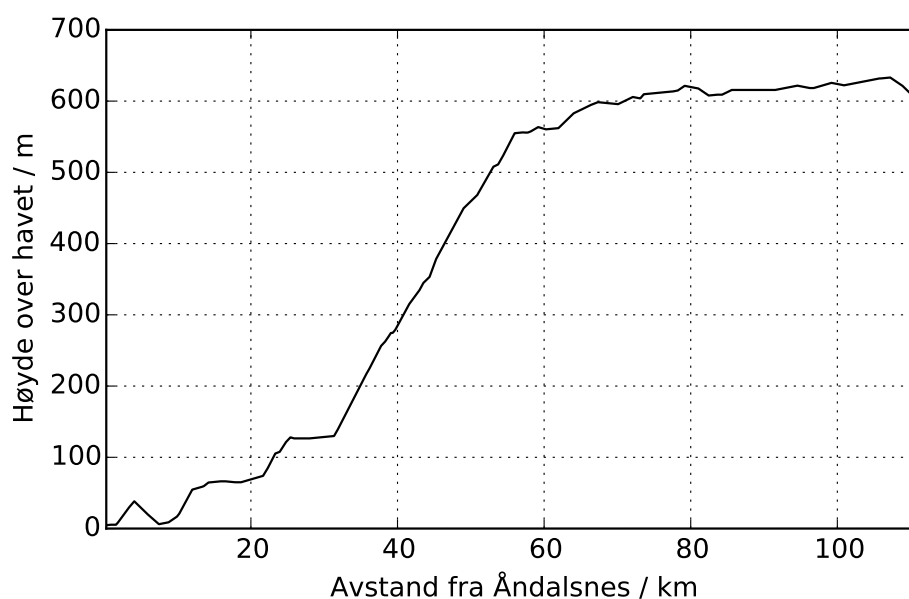
Figur 60: Energiforbruk for referansegodstoget over Røros- og Solørbanen fra Kongsvinger til Støren med forskjellige framdriftsteknologier.



Figur 61: Energiforbruk for referansegodstoget over Rørø- og Solørbanen fra Støren til Kongsvinger med forskjellige framdriftsteknologier.



Figur 62: Energiforbruk for tømmeretog fra Østerdalen (Koppang) over Rørø- og Solørbanen med forskjellige framdriftsteknologier.



Figur 63: Høydeprofil for Raumabanen mellom Åndalsnes (0) og Dombås (111). Andre relevante stasjoner er Verma (39), Bjorli (57), Lesjaverk (77) og Lesja (97).

Ilb.2.6 Raumabanen

Raumabanen er en 111 km³⁷ lang enkeltsporet strekning som brukes til gods- og passasjertransport mellom Åndalsnes og Dombås, og om sommeren til turisttransport fra Åndalsnes til Bjorli. Raumabanen er på flere måter en spesiell jernbane; påfallende er stigningstallet ved Verma, helt opp i 30 ‰. Utsikten fra toget er en ressurs for turismen i Møre og Romsdal, og dette taler mot installasjon av KL-anlegg.

Ilb.2.6.1 Godstransport

Godstog som kjører Raumabanen har oftest Alnabru godsterminal som opprinnelse eller bestemmelsested; på Dombås bytter man gjerne lokomotiv for å unngå å kjøre den lange elektrifiserte strekningen på diesel.

Raumabanen har veldig stor stigning, opp til 30 ‰. Dette gjør det umulig å bruke samme referansetog lengde som for Nordlands-, Røros- og Solørbanene som beskrevet i avsnitt Ilb.1.1.

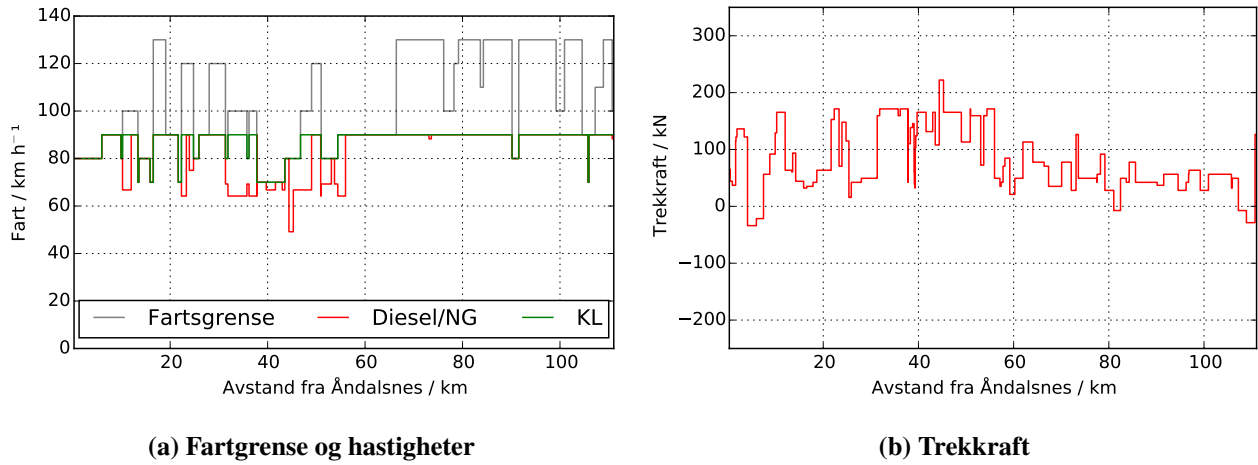
For Raumabanen benyttes derfor et modifisert referansetog, med formasjons-ID fo-CD312-301m-600t. Dette toget har et dieseldrevet CD 312 lokomotiv som antatt i avsnitt Ilb.1.1, men godsvognene veier 600 t og er 278 m lange (uten lokomotiv), i antall antatt 14 godsvogner.

Høydeprofilen for Raumabanen er vist i figur 63. Den bratte stigningen mellom Åndalsnes og Bjorli følges av en flat strekning mellom Bjorli og Dombås.

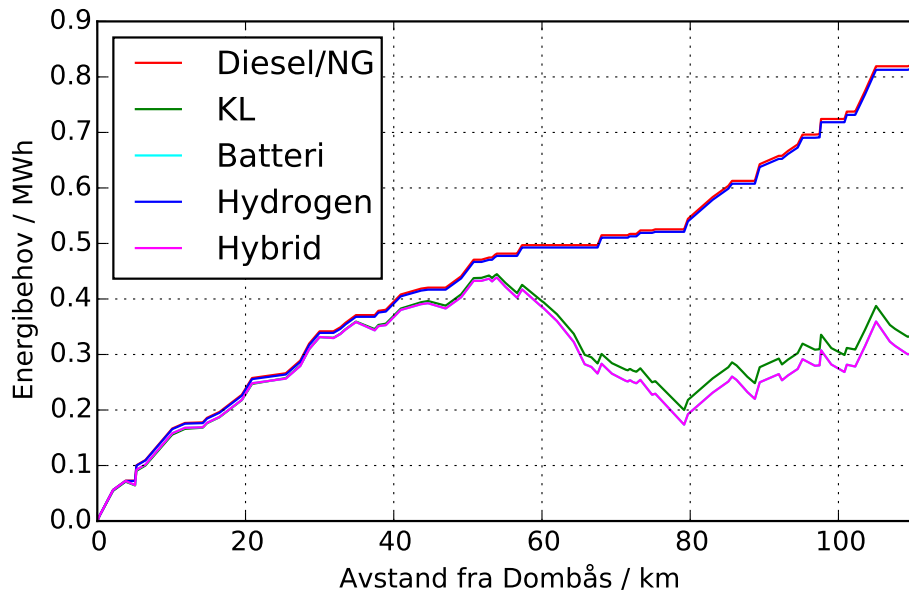
På grunn av den store høydeforskjellen er retningen fra Åndalsnes til Dombås dimensjonerende. Hastighet og trekraft for denne retningen er presentert i figurene 64a og 64b. På vei opp mot Bjorli kan el-lokomotivet holde en høyere fart enn diesellokomotivet flere steder, mens hastigheten er senere lik; på vei til Åndalsnes er hastigheten lik hele veien. Trekraften er som forventet høyere mot Bjorli, opp til 200 kN; det er altså margin for å bruke et lengre tog med el-lokomotiv, som har maksimal trekraft 300 kN.

Energiprofilen over Raumabanen er veldig forskjellig med retningen, som vist i figurer 65 og 66. På vei til Dombås er energibehov omtrent likt for alle alternativer, mens på vei ned til Åndalsnes er det store forskjeller mellom teknologier med eller uten regenerativ bremsing: over 0,4 MWh kan spares: toget kan faktisk kjøre på kun regenerert energi fra Bjorli ned til Åndalsnes.

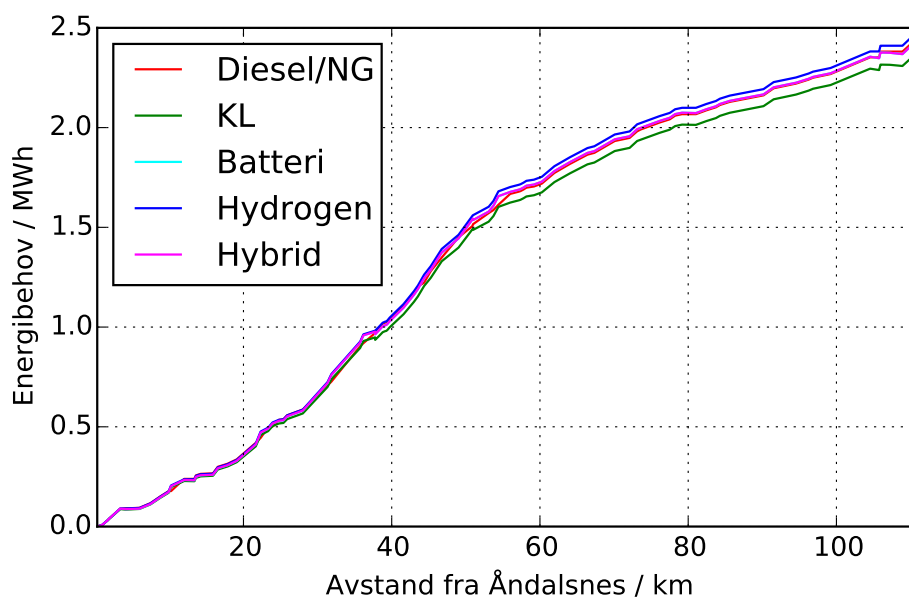
³⁷Det er flere steder oppgitt 114 km, men railML-filene viser 111 km; det antas at forskjellen skyldes kjedebrudd. Konklusjonene i rapporten blir uansett upåvirket av denne lille forskjellen.



Figur 64: Nominelle hastigheter og trekkraft for et godstog (med halve lasten sammenlignet med referansegodstoget) på vei fra Åndalsnes til Dombås. Hastighetene er noe forskjellige mellom diesel og elektrisk lokomotiv, mens trekkraften er omtrent det samme (diesel er plottet).



Figur 65: Energiforbruk for et godstog fra Dombås til Åndalsnes med forskjellige framdriftsteknologier.



Figur 66: Energiforbruk for et godstog fra Åndalsnes til Dombås med forskjellige framdriftsteknologier.

Én tur-retur reise mellom Dombås og Åndalsnes bruker 2,8 MWh med batterivogn, som kan lades av kontaktledningen på Dombås. Én enkel batterivogn, med kapasitet 5,7 MWh, kan dermed forsyne toget med god margin for både tur og retur.

Den sterkt asymmetriske energiprofilen gjør at regenerativ bremsing dimensjoneres på vei ned til Åndalsnes (figur 67a), og hydrogenhybriden dimensjoneres på vei opp til Dombås (figur 58).

En hybridløsning vil da benytte brenselceller for 1,9 MW og bufferbatteri for 0,5 MWh; dette batteriet er nok til å lagre regenerativ energi på vei ned til Åndalsnes (0,25 MWh). Dette gir mye plass igjen til hydrogenlagring, som blir 71 MWh netto; dette er mye større enn energibehovet for å kjøre hele banen, og er nok overdimensjonert. Det kunne være aktuelt å redusere hydrogenlasten og bruke en mindre plattform, men dette ville gå på bekostningen av standardisering av utstyr. Godstrafikken over Raumabanen vil sannsynligvis ikke danne grunnlag for egne løsninger, og derfor beholdes den samme boggivogn som i andre baner.

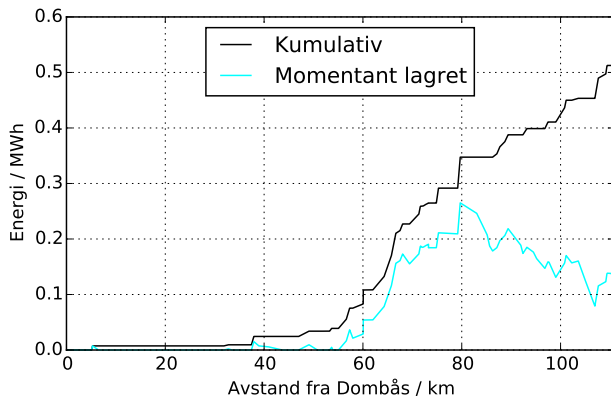
IIb.2.6.2 Persontransport

Persontransport over Raumabanen er en viktig ressurs for turismen i Møre og Romsdal. Installasjon av KL-anlegg ville ødelegge utsikten fra toget, som tiltrekker turister, men elektrisk framdrift ville gi en bedre miljøprofil. Det understrekes at batteri- og hydrogenframdrift for persontog kan ikke realiseres på samme måte som for godstog, der en hel vogn ble brukt til lagring av batterier eller hydrogen; eksisterende togsett vil måtte tilpasses med støtte fra leverandørene.

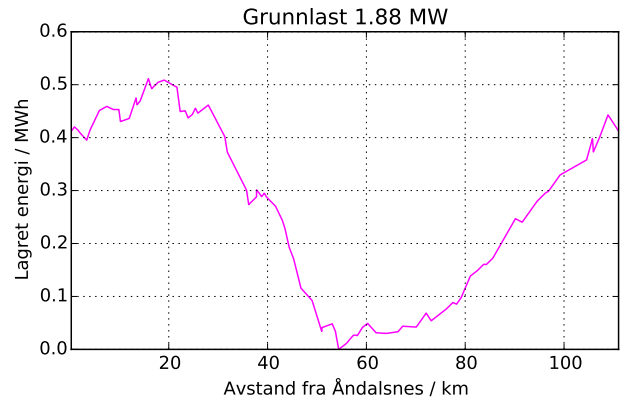
For persontransport over Raumabanen brukes i dag den dieseldrevne motorvognen NSB Type 93 (formasjons-ID fo-BM93-E), som er 39 m lang og veier 90 t (passasjerer medregnet), avbildet i figur 68a. Det er ikke opplagt hvordan en elektrifisert versjon av denne vil se ut, siden elektriske motorvogner er typisk lengre; den mest naturlige sammenligningen er med FLIRT-toget NSB Type 75 (formasjons-ID fo-BM74RE-E), som er nesten tre ganger så lang (106 m) og veier 244 t (avbildet i figur 68b). Det skal da sammenlignes en formasjon av tre sammenkoblede NSB Type 93 mot NSB Type 75 med forskjellige elektrifiseringsløsninger (KL, batteri, hydrogen).

Betraktningene for godstog gjelder kvalitativt også for persontog: energibehovet er 1,1 MWh mot Dombås, 0,65 MWh mot Åndalsnes (0,4 MWh med regenerativ bremsing), som vist i figurer 70 og 71.

En ren batteriløsning vil da kreve minst 1,5 MWh, som veier 15 t. En ren hydrogenløsning kan dimensjoneres



(a) Regenerativ bremsing



(b) Batteribuffer

Figur 67: Dimensjonerende profiler for regenerativ bremsing (ned til Åndalsnes) og for bufferbatteri til hydrogenhybrid (opp til Dombås).

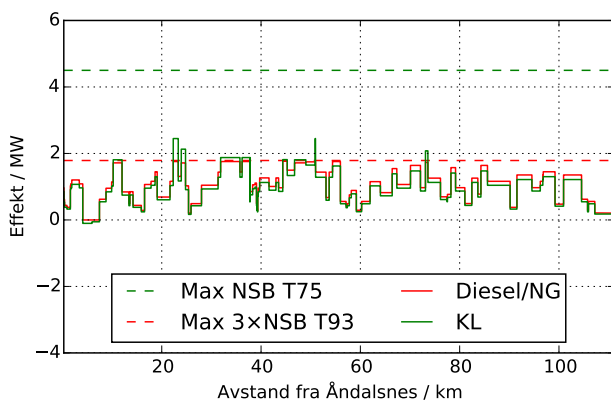


(a) Dieseldrevne Type 93 (© Petr Šmerkl, Wikipedia)

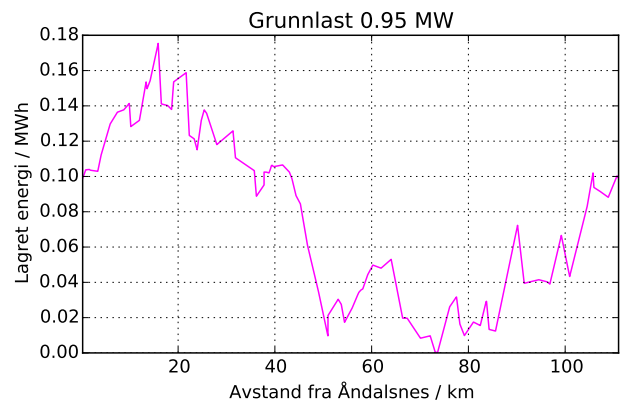


(b) Elektriske Type 75 (© MPW57, Wikipedia)

Figur 68: NSBs elektriske og dieseldrevne motorvogn.

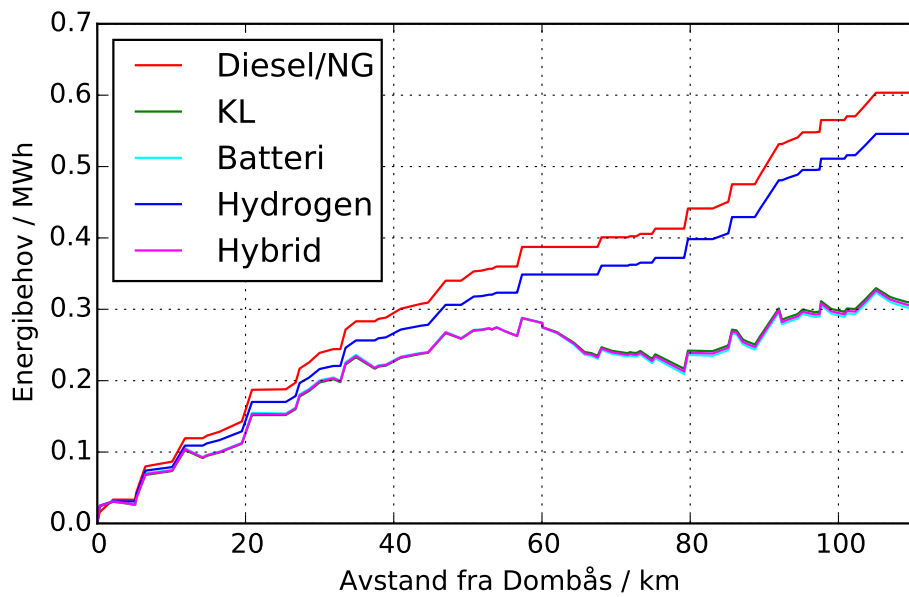


(a) Effekt

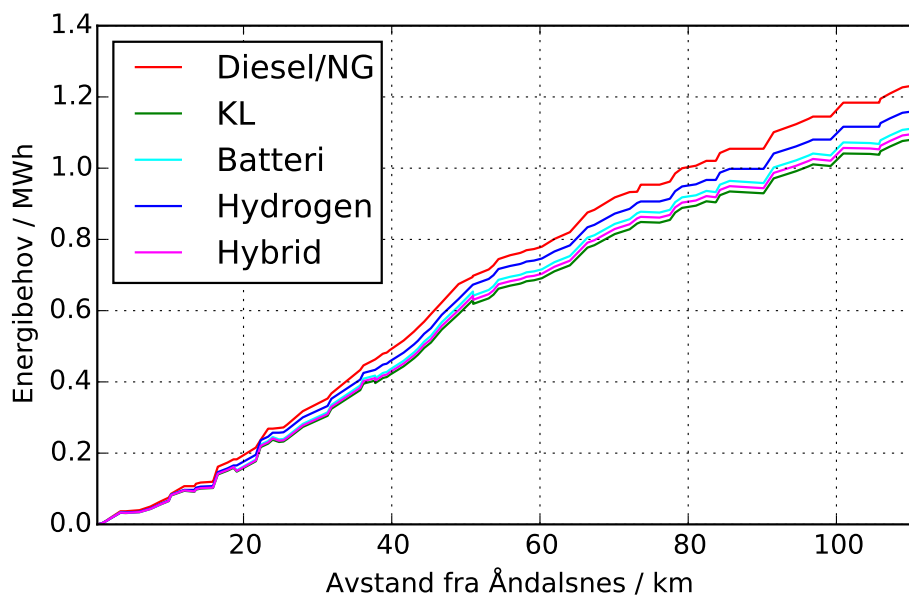


(b) Batteribuffer

Figur 69: Effektprofil for persontog over Raumabanen i retning Dombås og profil for bufferbatteri til hydrogenhybrid i samme retning.



Figur 70: Energiforbruk for et passasjertog fra Dombås til Åndalsnes med forskjellige framdriftsteknologier.



Figur 71: Energiforbruk for et passasjertog fra Åndalsnes til Dombås med forskjellige framdriftsteknologier.

Tabell 19: Reisetidene for de undersøkte ikke-elektrifiserte strekninger med diesel- og elektrisk referansetog.

	Diesel	Elektrisk	Differanse
Nordlandsbanen			
Sørover	7:33	7:01	32 min
Nordover	7:41	7:05	36 min
Rørosbanen			
Sørover	4:53	4:45	8 min
Nordover	4:57	4:49	8 min
Røros- og Solørbanen			
<i>Støren-Kongsvinger</i>			
Sørover	5:38	5:32	6 min
Nordover	5:51	5:46	5 min
<i>Tømmertog fra Koppang</i>			
Sørover	2:09	2:08	1 min
Nordover	2:21	2:20	1 min
Raumabanen			
<i>Godstog</i>			
Østover	1:21	1:18	3 min
Vestover	1:23	1:23	0 min
<i>Persontog</i>			
Østover	1:10	1:09	1 min
Vestover	1:17	1:17	0 min

med brenselceller for 2 MW, da det sjelden blir brukt mer enn dette (se figur 69a), samt 1,6 MWh hydrogen (slik at det ikke er nødvendig å ha fyllestasjon både på Dombås og i Åndalsnes), for totalt 9 t ekstra vekt. En hybridløsning vil ha 1 MW brenselceller og 0,2 MWh batterier (se figur 69b) istedenfor 2 MW brenselceller, som reduserer vekten ytterligere til 7,5 t.

IIb.2.7 Konklusjoner for energianalysene

Analysen av ikke-elektrifiserte jernbaner viser at energibehovet er noenlunde lik for alle alternativer, selv om regenerativ bremsing kan spare mellom 10 og 20 % av energibehovet.

En vesentlig forskjell mellom lokomotiver er at dieseldrevne har mer trekraft på grunn av sin større friksjon (som følger av lokomotivets større vekt), mens elektriske kan levere mer effekt og kan nå større hastigheter, forutsatt at de ikke må yte for høy trekraft i forløpet.

Dette kan merkes i tabell 19, hvor reisetiden over Nordlandsbanen kan reduseres med en halvtime fordi det elektriske lokomotivet kan kjøre mye raskere opp Saltfjellet. I andre tilfeller er det en viss fordel for elektrisk drift, som riktignok er oftest marginal.

Ellers ble det beregnet at trekraften for Nordlands-, Røros og Solørbanene alltid er under 300 kN, som er starttrekkraften for det elektriske lokomotivet CE 119. Raumabanen, på grunn av sin høye stigning, gjorde en reduksjon av lasten nødvendig; hverken dieseldrevet eller elektrisk lokomotiv kunne drive referansetog opp til Bjorli.

For et batteridrevet tog er det nødvendig med tre batterivogner for Nordlandsbanen, to for Røros- og Solørbanen, og én for Raumabanen. Det er mulig å halvere antallet batterivogner (eller redusere til to for Nordlandsbanen) ved å stanse toget ved en stasjon og lade batteriene (oppladingen vil ta cirka en time); egnede stasjoner er Mosjøen på Nordlandsbanen og Alvdal på Rørosbanen. Alternativt kan det bygges ut en kortere strekning med kontaktledning for å lade batteriene under kjøring; strekningen vil da måtte være cirka 80 km lang.

Tabell 20: Designalternativer for en hydrogenvogn uten og med bufferbatteri for forskjellige strekninger. Hydrogenlager er dimensjonert slik at den opptar alt tilgjengelig lastekapasitet på boggivognen etter at brenselceller og batterier er på plass.

Jernbane	Teknologi	Dimensjonering	Vekt
Ingen buffer	Brenselceller	5,58 MW	15 t
	Batterier	0 MWh	0 t
	Hydrogenlager	67 MWh	42 t
Totalvekt			57 t
Nordlandsbanen	Brenselceller	2 MW	8 t
	Batterier	2 MWh	20 t
	Hydrogenlager	46 MWh	29 t
Totalvekt			57 t
<i>3,3 togbevegelser med én fylling</i>			
Røros- og Solørbanen	Brenselceller	1,8 MW	7 t
	Batterier	1,8 MWh	18 t
	Hydrogenlager	51 MWh	32 t
Totalvekt			57 t
<i>5,6 togbevegelser med én fylling</i>			
Raumabanen	Brenselceller	1,9 MW	7,5 t
	Batterier	0,5 MWh	5 t
	Hydrogenlager	71 MWh	44,5 t
Totalvekt			57 t
<i>55 togbevegelser med én fylling</i>			
Standard	Brenselceller	2,5 MW	10 t
	Batterier	1,5 MWh	15 t
	Hydrogenlager	51 MWh	32 t
Totalvekt			57 t

Siden en varierende last degraderer brenselceller raskere enn jevn last og reduserer deres levetid, ble det observert at man kunne hybridisere disse med batterier slik at brenselcellene leverer en konstant grunnlast, og batteriene leverer ekstra effekt eller lagrer overskuddet.

Det ble riktignok også observert at forskjellige nivåer for hybridisering med hydrogen og batterier er optimale for forskjellige baner, som vist i tabell 20; men det er ønskelig å standardisere hybridvogner. Det er derfor lagt til en foreslått “standard” hybridvogn med noe mer brenselcelleeffekt (2,5 MW) for å kompensere et mindre batteri (1,5 MWh). Den høyere effekten tillater en mer fleksibel bruk av brenselcellene, samtidig frigjør de mindre batteriene plass for mer hydrogen på vognen.

IIb.3 Økonomi

Dette avsnittet handler om investerings- og driftskostnader for de forskjellige alternativene som ble presentert i de forrige avsnittene; det gjøres oppmerksom på at enkelte teknologier er i rask utvikling, er relativt nye, eller sjelden er blitt bestilt til så store prosjekter.

Det skal også bemerkes at det hensyntas kun kostnader og ikke inntekter i denne analysen, fordi alle alternativer er antatt å levere lik inntekt.

Tabell 21: Energibehov over elektrifiserte strekninger for elektriske og dieseldrevne tog. Merk at energibehovet er definert som energien som må tilføres hjulene, og ikke tar hensyn til energikildenes virkningsgrader, som er svært varierende. Forskjellene i tabellen skyldes først og fremst regenerativ bremsing, som er antatt tilgjengelig kun for elektriske tog.

Strekning	Diesel	Elektrisk	Lengde
Trønderbanen			
Trondheim–Steinkjer	3,45 MWh	2,68 MWh	118 km
Steinkjer-Trondheim	3,71 MWh	3,03 MWh	
Dovrebanen			
Trondheim–Støren	1,84 MWh	1,39 MWh	51 km
Støren–Trondheim	1,50 MWh	1,27 MWh	
Hamar–Alnabru	3,96 MWh	3,05 MWh	124 km
Alnabru–Hamar	4,54 MWh	3,07 MWh	
Kongsvingerbanen			
Kongsvinger–Alnabru	2,61 MWh	2,09 MWh	90 km
Alnabru–Kongsvinger	3,11 MWh	2,35 MWh	
Kongsvinger–Charlottenberg	1,01 MWh	0,88 MWh	41 km
Charlottenberg–Kongsvinger	1,24 MWh	1,11 MWh	

Ilb.3.1 Flytende naturgass

Det er særlig vanskelig å spå prisen på naturgass som alternativ til diesel, da dette avhenger mest av leveranseavtaler for naturgass og tilgjengelighet av LNG-terminaler ved havner i for eksempel Trondheim, Bodø og Åndalsnes. Naturgass vil derfor ikke vurderes i dette avsnittet, men resultatene for diesel vil være en god tilnærming.

Investering for flytende naturgass vil ellers være minimal: man vil lease naturgassdrevne lokomotiver istedenfor dieseldrevne, som vil ha lignende teknologi og ytelse; flytende naturgass vil i fremtiden kunne være tilgjengelig i havneområder, som er i umiddelbar nærhet til f.eks Trondheim Sentralstasjon, Bodø stasjon og Åndalsnes stasjon.

Det er altså ikke investeringskostnadene som begrenser naturgass-alternativet, men heller om flytende naturgass vil bli tilgjengelig i havneområdene.

Det må også påpekes at flytende naturgass vil innebære redusert fleksibilitet, da den bare vil kunne fylles ved de få stasjoner som vil ha tilgang til brenselet, og vil ikke kunne bruke KL-anlegget (i motsetning til batteri- og hydrogentog).

Ilb.3.2 Energibehov på elektrifiserte strekninger

Energiberegningene i avsnitt Ilb.2 ble brukt til å dimensjonere togsettene (antall batterivogner osv.), men representerer ikke normale togreiser. Reiser over Nordlandsbanen starter fra Trondheim, ikke Steinkjer: selv om batteri- og hydrogensystemer dimensjoneres utifra Steinkjer-Bodø, vil det ikke være aktuelt å bytte el-lokomotiv med diesellokomotiv i Steinkjer, både av hensyn til reisetid og fordi det ikke er noen egnet teknisk avdeling i Steinkjer som kan foreta lokomotivbytte. Av samme grunn er det uaktuelt med lokomotivbytte på Støren, Hamar og Kongsvinger, mens det er vanlig å bytte lokomotiv på Dombås i forbindelse med Raumabanen.

Derfor må man sammenligne økonomitall over *hele banen* for å få et representativt bilde. Energibehov for de elektrifiserte strekninger mellom Trondheim-Bodø og Trondheim-Oslo for diesel og KL er vist i tabell 21. Disse data vil brukes sammen med de foreslåtte alternative drivstoff, under den antagelsen at alle teknologier med elektrisk drevet lokomotiv vil benytte seg av KL-anlegget hvor det er tilgjengelig.

IIb.3.3 Sammenligningskriterium for forskjellige teknologier

De undersøkte teknologiene har veldig forskjellig levetid, og investeringene vil derfor sammenlignes ved *annuitetsmetoden*. Annuitetsmetoden anvendes for å beregne en ekvivalent årlig kostnad (*annuitet*) som tilsvarer en gitt investering og levetid. Driftskostnader kan enkelt summeres med annuiteten, slik at alternativer med svært forskjellig tidshorisont kan vurderes utifra ekvivalente årlige total kostnader, som er summen av drift og annuiteter.

Jernbaneverket bruker gjerne nåverdimetoden (“NNV”): der to investeringer skal sammenlignes og har forskjellig tidshorisont, regnes det med reinvesteringer for den kortere investeringen etter sistnevntes levetid løper ut; oftest benyttes det en tidshorisont på 75 år. Jernbaneverket benytter nåverdimetoden på samfunnsøkonomisk kostnad, hvor også andre kostnader enn direkte kostnader verdsettes, f.eks tidsgevinster; disse kan også implementeres i annuitetsmetoden. Disse to metodene er sammenlignet i detalj i vedlegg F.

Nåverdimetoden er ikke egnet for denne rapporten da et sentralt faktum er at de nye teknologiene endrer sin kostnad radikalt fram til 2050. En nåverdberegning av for eksempel batterier vil derfor måtte ta høyde for at:

- Batteriene koster mindre jo lengre frem i tiden;
- Batterilevetiden øker, det vil si at periodene for reinvesteringene ikke er konstante.

Lignende betraktninger gjelder for brenselceller, hydrogenlagring, og hydrogenstasjoner. En slik beregning er ikke umulig, men vil inneholde en uoversiktlig blanding av data med varierende sikkerhet. Dessuten ville en nåverdberegning med utgangspunkt i 2050 kreve en estimering av teknologiutvikling fram til 2125, som ville ha uakseptabelt høy usikkerhet.

En investering I foretatt ved tid $t = 0$, som har levetid n år, har per definisjon en nåverdi $NNV = I$.

Med en antatt rente r , er denne investeringen da ekvivalent med årlige utgifter k fra år 1 til år n :

$$I = NNV = \sum_{i=1}^n \frac{k}{(1+r)^i} = k \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{1+r} \right)^i \quad (13)$$

Summen i siste ledd er en geometrisk rekke, som kan uttrykkes som:

$$\sum_{i=1}^n x^i = \frac{1-x^{n+1}}{1-x} \quad (14)$$

Ligning 13 blir da:

$$I = NNV = k \frac{\overbrace{1 - \frac{1}{(1+r)^n}}^{A_{n,r}}}{r} \quad (15)$$

Annuiteten kan da lett beregnes som $k = I/A_{n,r}$.

Det vil benyttes Jernbaneverkets kalkulasjonsrente $r = 4\%$, som gjelder fram til 2055 [58, tabell 4.1]; alle kostnader vil uttrykkes i 2015-kroner.

IIb.3.4 Kompensering for redusert nyttebelastning

For flere alternative drivstoff forutsettes det at én eller flere vogner brukes til å frakte energikilden (batterier, brenselceller eller hydrogen). Hver boggivogn som vist i figur 43 tar opp 20,75 m som ellers ville ha blitt brukt til frakt.

For å regne med denne effekten, antas det at den samme last fraktes over ett år, og den reduserte kapasiteten kompenseres ved flere togreiser. Med n batteri-, hydrogen- eller hybridvogner er korreksjonsfaktoren:

$$k = \frac{575 \text{ m}}{575 \text{ m} - n \times 20,75 \text{ m}} \quad (16)$$

Tabell 22: Kostnader for tilgjengelige teknologier.

Teknologi	Kostnad (Levetid)	Kilde
Investeringer		
KL-anlegg	15 MNOK/km (75 år)	[11] ³⁸ , [58, avsnitt 4.2]
El-lokomotiv	34,9 MNOK (20 år)	[58, tabell 7.8]
Diesel-lokomotiv	25,1 MNOK (20 år)	[58, tabell 7.8]
Ladestasjon	3,5 MNOK (75 år)	Heidi Midtun, JBV
Drift (på årsbasis)		
Vedlikehold, El-lok	25,78 NOK/km	[58, tabell 7.8]
Vedlikehold, Diesel-lok	45,12 NOK/km	[58, tabell 7.8]
Vedlikehold, KL	50 000 NOK/km	[59]
Virkningsgrad, KL	81 %	[4, tabell 1]
Kraftpris	310 NOK/MWh	[58, tabell 7.7]
Dieselpriis	3224 NOK/MWh	[4, tabell 6] ³⁹
Diesellavgift for godstog	20,72 NOK/km	[58, tabell 7.10]
Diesellavgift for persontog	1,55 NOK/km	[58, tabell 7.10]
Tidskostnad for gods	13,37 NOK/t h	[58, tabell 7.4]

Alle kostnader som avhenger av kjørte kilometer, antall reiser eller reisetid vil multipliseres med k for å representere kostnaden av redusert nyttelast.

Et alternativ som ikke krever en økning i antall reiser er å legge ekstravognene til referansetogsettet uten å forkorte toget. Dette vil ha flere uheldige konsekvenser:

- Det vil være nødvendig å forlenge alle kryssningsspor over banen, da alle ikke-elektrifiserte baner har enkeltspor;
- Det økte lasten kunne gjøre det umulig for ett lokomotiv å føre toget over områder med sterk stigning, f.eks. Saltfjellet.

En energianalyse av Nordlandsbanen med uforandret godsseksjon presenteres i vedlegg G.

IIb.3.5 Kostnadsberegning

Data for å sammenligne økonomisk de teknologiske alternativene som er beskrevet i avsnittene ovenfor er samlet i forskjellige tabeller: tabell 22 presenterer kostnader for investering og drift av kjent teknologi, som ikke forventes å forandre seg med tiden; tabell 23 viser hvordan kostnader og tekniske parametre for alternative teknologier kan utvikle seg fram til 2050.

Kostnadene er gjennomgående estimert ved innkjøpspunkt for Jernbaneverket eller operatørene.

IIb.3.5.1 Energibærere

Følgende løsninger vil vurderes økonomisk:

- Diesel (dagens løsning);

³⁸Beregnet fra investering i elektrifisering av Trønder- og Meråkerbanene på 4000 MNOK, og strekningslengder 125 km for Trondheim-Steinkjer og 75 km for Hell-Meråker; redusert etter samtale med Jernbaneverket til 15 MNOK/km.

³⁹Fra NSBs oppgitte energitetthet for diesel 42,7 MJ/kg, altså 10,1 MWh/m³, en antatt dieselpriis på 13 NOK/liter, og en estimert virkningsgrad på 40 %.

⁴⁰Det er ikke tabulert klare verdier for levetid, i og med en fyllestasjon består av mange komponenter. Riktignok er tall mellom 7 og 15 år benyttet mellom 2010 og 2030. Vi har ekstrapolert fra disse verdiene.

Tabell 23: Kostnadene for alternative teknologier. Dollarkursen er satt til 1 \$=7,5 NOK.

Teknologi	2015	2021	2027	2050	Kilde
Batterier	500 \$/kWh	300 \$/kWh	200 \$/kWh	100 \$/kWh	[55]
Levetid i ladesykluser	1500	2000	2500	4000	[55]
Energitetthet	100 Wh/kg	150 Wh/kg	200 Wh/kg	300 Wh/kg	[55]
Virkningsgrad	85 %	85 %	90 %	90 %	[60]
Brenselceller	300 \$/kW	70 \$/kW	40 \$/kW	30 \$/kW	[44, fig. 3]
Levetid dynamisk last	12 000 h	15 000 h	20 000 h	30 000 h	[61, slide 6]
Dynamisk virkningsgrad	59 %	60 %	65 %	70 %	[62, tab. 3.4.3]
Levetid statisk last	50 000 h	80 000 h	100 000 h	120 000 h	[62, tab. 3.4.6]
Statisk virkningsgrad	45 %	50 %	55 %	60 %	[62, tab. 3.4.6]
Hydrogenlagring	12 \$/kWh	12 \$/kWh	8 \$/kWh	8 \$/kWh	[63]
Levetid	20 år	20 år	25 år	30 år	
Hydrogenstasjon	4,4 k\$/(kg/dag)	4 k\$/(kg/dag)	2,9 k\$/(kg/dag)	2 k\$/(kg/dag)	[64, tab. 4]
Levetid	10 år	12 år	15 år	20 år	[62, 64] ⁴⁰
Virkningsgrad	72 %	75 %	77 %	80 %	[62, tab. 3.1.4]
Vedlikehold	Antatt 40 % av annualiserte kapitalkostnader				[65, p. 52]

- Biodiesel;
- KL-anlegg;
- Batteritog;
- Batteritog med mindre batteri og mellomading;
- Batteritog med mindre batteri og kort strekning med KL-anlegg (80 km);
- Hydrogentog (kun med brenselceller);
- Hydrogenhybridtog (med brenselceller og bufferbatteri).

Kostnad og virkningsgrad for alle energiformer refereres til innkjøp, for eksempel av dieseldrivstoff fra leverandør eller strøm fra nettet.

Det er viktig å merke at KL-anlegg vil kunne brukes av andre tog utover de som blir beregnet her; kostnaden kunne altså i fremtiden reduseres hvis trafikkmengden skulle øke.

Et KL-anlegg har en lang levetid, og investeringene er forholdsvis store; derimot er batteripakker billigere og har kortere levetid. Dette gjør at en investering i et KL-anlegg er langt mer forpliktende enn batteri- eller hydrogentog.

IIb.3.5.2 Rullende materiell, investering

Investeringer i rullende materiell inkluderer innkjøp av lokomotiver (diesel eller elektrisk), med antakelsen om at lokomotiver til fremdrift av batteri- og hydrogentog har samme pris som et lokomotiv til en bane med KL-anlegg. Tall fra Jernbaneverkets Metodehåndbok [58] blir benyttet.

For batteritog må det beregnes hvor mange batterivogner som trenges for å kjøre den ikke-elektrifiserte delen av banen; da det forventes en betydelig teknologisk utvikling fram til 2050 (se tabell 23), vil antall batterivogner endre seg med året.

Batterivogner har en relativt kort levetid: de må nødvendigvis dimensjoneres for å bruke opp hele sin kapasitet over den ikke-elektrifiserte strekning av banen, for å minimere størrelsen, og det betyr at hver reise tilsvarer en

Tabell 24: Kostnad for diesel for alle evaluerte baner. Alle banene vurderes langs hele strekningen, ikke bare den ikke-elektrifiserte: Rørosbanen er altså fra Trondheim til Alnabru, ikke fra Støren til Hamar. Raumabanen er betydelig billigere da toget for Raumabanen er halvparten så langt som i de andre tilfellene.

Bane	Dieselkostnad
Nordlandsbanen	83,03 NOK/tog km
Rørosbanen	87,29 NOK/tog km
Røros- og Solørbanen	81,56 NOK/tog km
Røros- og Solørbanen (tømmertog til Sverige)	73,73 NOK/tog km
Raumabanen	43,57 NOK/tog km
Metodehåndboka	68,37 NOK/tog km

ladesyklus. Dette begrenser levetiden til noen år, avhengig av bruksmønster. I tilfellet batteriet lades opp under reisen (f.eks. ved mellomlading), vil hver reise innebære to sykluser, og dermed vil levetiden (i år) halveres.

Brenselceller kan dimensjoneres for å levere hele effekten som en CE 119 kan omvandle til bevegelse, 5,58 MW, eller for en mindre effekt, 2,5 MW, under forutsetningen at det er et batteri på 1,5 MWh som leverer ekstra effekt for akselerasjon, som vist i tabell 20. Til disse to tilfellene hører også en litt forskjellig dimensjonering av hydrogenlageret.

IIb.3.5.3 Rullende materiell, drift

Denne posten inkluderer energiforbruk og vedlikehold av lokomotiver. For diesel er det også regnet inn miljøavgift, som ikke anvendes fullt på biodiesel: det regnes med at avgiften vil reduseres proporsjonalt med reduksjonen i utslippene. Det antas her at biodiesel vil redusere utslippene med 60 % sammenlignet med diesel i 2015 (1. generasjon), og med 90 % fra og med 2020 (2. generasjon)⁴¹.

Dieselalternativene regner med at lokomotivet kjører på diesel hele banens lengde, altså at det ikke byttes lokomotiv når man går over mellom elektrifisert og ikke-elektrifisert bane. Metodehåndboka oppgir en sats for diesel på 68,37 NOK/tog km [58, tabell 7.8], men dette ser vi bort fra fordi den ikke tar hensyn til togets masse; verdiene som beregnes av tabellene 22 og 25 er likevel ikke langt unna, og er presentert i tabell 24.

For KL-anlegg, regnes det med et overføringstap på 19 %, i samsvar med data publisert fra NSB [4].

For batteri- og hydrogenalternativene, regnes det med virkningsgrad til KL-anlegg for de elektrifiserte strekningene og med teknologiens egen virkningsgrad på de ikke-elektrifiserte. For hydrogen brukes det den kombinerte virkningsgraden av brenselceller og fyllestasjon.

IIb.3.5.4 Infrastruktur, investering

Ingen ny infrastruktur er nødvendig med diesel.

I samråd med Jernbaneverket, og med utgangspunkt i midlene som ble avsatt for elektrifisering av Trønderbanen og Meråkerbanen, ble det avgjort at en kostnad på 15 MNOK/km vil benyttes for KL-anlegg; lignende tall ble oppgitt av Dukan [66]. Det må likevel bemerkes at denne kan variere sterkt avhengig av flere forhold:

- for lave bruer som må bygges om [67];
- tunneler må utvides;
- persontrafikk på banen gjør KL-anleggsarbeidene mye dyrere;
- spesielle klimatiske og geografiske forhold (f.eks. Saltfjellet) kan gjøre KL-anlegg dyrere.

⁴¹Jfr. del A, 4.6.

Dette betyr at faktiske kostnader for KL-anlegg per kilometer vil kunne sprike mellom forskjellige baner, og mellom forskjellige avsnitt av samme bane. Den antatte kostnaden 15 MNOK/km bør erstattes av et nøyere estimat for hver projisert KL-anlegg når dette foreligger; SINTEF vurderer at usikkerheten for denne kostnaden er cirka ± 2 MNOK/km.

Levetiden til KL-anlegg er oppgitt til å være 75 år i Metodehåndboka til Jernbaneverket [58], men har kommet signaler fra enkelte i Jernbaneverket at 50 år er et bedre tall. Denne rapporten forholder seg til Metodehåndboka og benytter dermed 75 år; hadde man brukt 50 år, ville man sett en økning på cirka 10 % i annuiteten for KL-anlegg (de siste 25 år gir minst bidrag i annuitetene).

Batterialternativene krever ladestasjoner ved endestasjonene, som kan sløyfes hvis endestasjonen allerede har tilgang til KL-anlegg eller hvis batteriene kan lades under kjøring i en elektrifisert strekning. Stasjonene som behøver ladestasjon er Åndalsnes, Bodø og Koppang.

Alternativt kan man legge til en ladestasjon halvveis i den ikke-elektrifiserte strekningen av banen, og lade batteriene der, noe som vil ta cirka en time; dette taes høyde for i form av høyere tidskostnad. Man vil i så fall omtrent halvere investeringskostnadene for batterier, men også deres levetid da hver reise vil innebære to ladesykluser. Riktignok vil man også redusere plassen batteriene opptar i toget, som kan da brukes til last.

Et annet alternativ er å legge cirka 80 km med kontaktledning halvveis i den ikke-elektrifiserte strekningen, slik at batteriene kan lades under kjøring.

For hydrogenalternativene er det nødvendig med en passe dimensjonert fyllestasjon som kan levere nok hydrogen til togene.

IIb.3.5.5 Infrastruktur, drift

Årlig vedlikehold av KL-anlegg (for alternativene med installering av fullskala KL-anlegg og kortere KL-anlegg for batterilading under kjøring) er oppgitt til å være 50 NOK/m.

For hydrogenstasjoner er få sikre tall tilgjengelige, men Dahl et al. [65] beregnet at de er omtrent 40 % av annualiserte kapitalkostnader. Usikkerheten bør ikke ha stor betydning for resultatene, da det dreier seg om relativt mindre kostnader. Det antas at dette forholdet vil forbli konstant i takt med teknologisk utvikling, altså at vedlikeholdskostnader reduseres i samme tempo som annualiserte kapitalkostnader.

IIb.3.6 Resultater

Med de inngangsparametrene fra tabell 25 og teknologiparametrene fra forrige avsnitt, beregnes annuitetskostnadene for hver bane og teknologi; for hvert år er kostnadene også inndelt mellom investeringer og driftskostnader, samt infrastruktur og rullende materiell.

IIb.3.6.1 Nordlandsbanen

For Nordlandsbanen antas det 6 lokomotiver og 10 togbevegelser per arbeidsdag mellom Trondheim og Bodø, med 300 arbeidsdager i året.

Utviklingen i den økonomiske analysen for Nordlandsbanen er vist i figur 72. Det er tydelig at KL-anlegg ikke er økonomisk forsvarlig på grunn av de store investeringskostnadene. Samtidig er dagens teknologi, diesel, den nest dyreste løsningen, mest på grunn av energikostnader og vedlikehold.

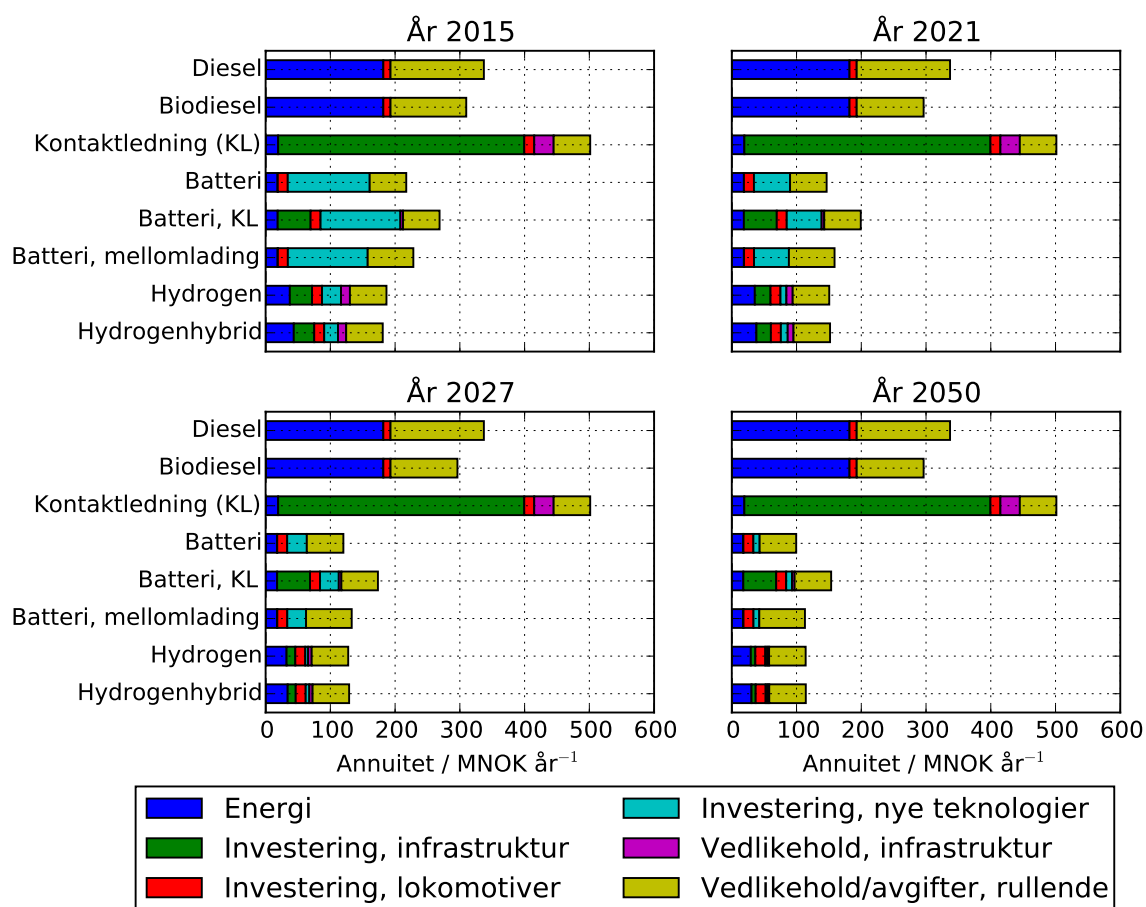
Potensialet for omstilling til biodiesel er 40 millioner pr. år, forutsatt at biodiesel har samme pris som vanlig diesel og at det benyttes 2. generasjons biodiesel (benyttet i figurene fra 2021).

Alle de alternative teknologiene er billigere enn diesel, og hydrogen skiller seg positivt ut, spesielt med dagens teknologi.

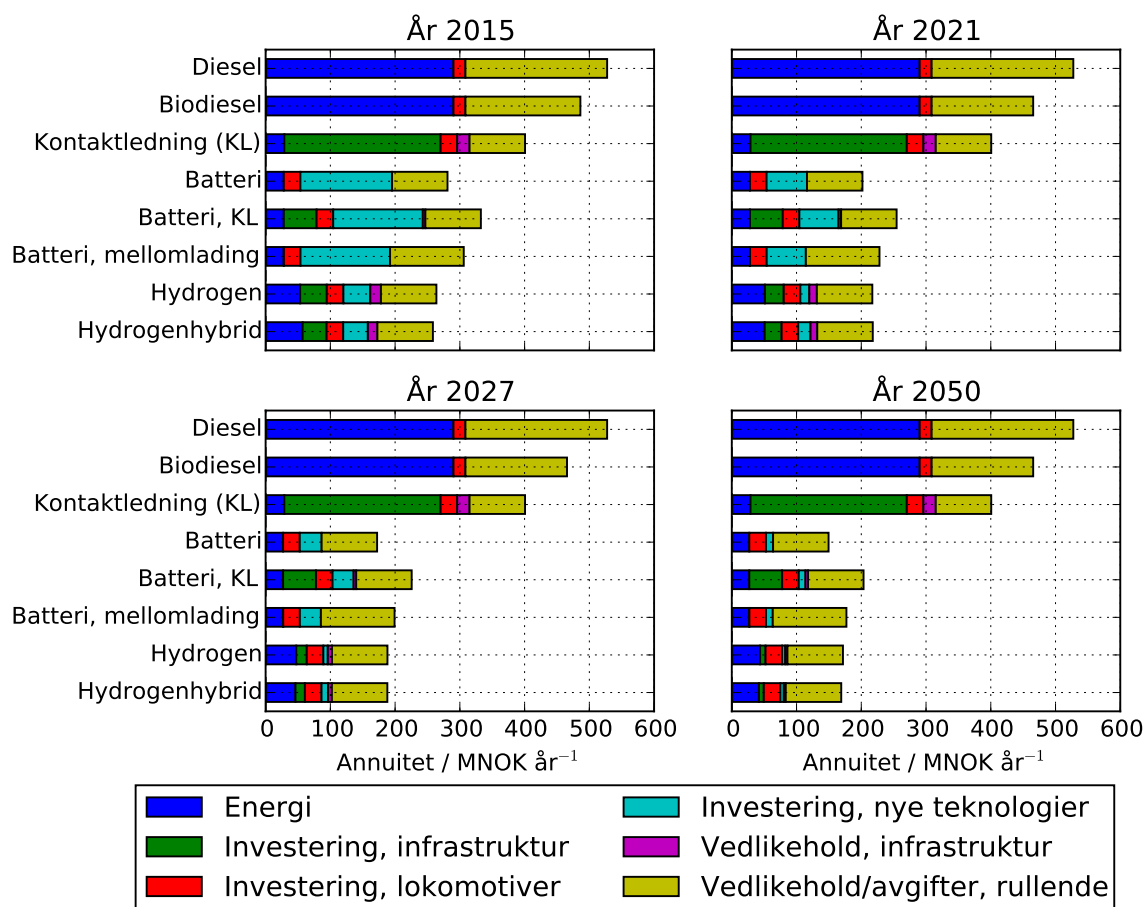
Batterier har høye investeringskostnader for år 2015, men disse forventes å gå ned kraftig i nærmeste fremtid. Mulighet for mellomading ved stans eller en kort KL-strekning virker ikke økonomisk fordelaktig, da den kortere levetiden av batteriene, som utsettes for dobbelt så mange ladingsykluser, kompenserer for den mindre investeringen i batteriene: annuitetene for investering i rullende materiell er faktisk tilnærmet like.

Tabell 25: Datagrunnlag for beregning av økonomisk vurdering av alternativene for godstransport: det er tatt hensyn til at togene kjører strekninger med og uten KL-anlegg. Energibehovet er oppgitt både for tilfellene uten regenerativ bremsing (diesel, hydrogen) og med (KL, batteri, hydrogenhybrid).

	Nordlandsbanen	Rørosbanen	Solørbanen		Raumabanen
Start	Trondheim	Trondheim	Trondheim	Koppang	Åndalsnes
Stopp	Bodø	Alnabru	Alnabru	Charlottenberg	Dombås
Lokomotiver	6	10	10	4	3
Årlige togbevegelser	3000	6000	6000	2400	1800
<i>Strekning uten kontaktledning</i>					
Lengde	600 km	381 km	444 km	182 km	111 km
Tid per reise	7:01	4:44	5:31	2:15	1:20
Energi	15,2 MWh	9,1 MWh	10,3 MWh	4,0 MWh	1,5 MWh
Energi (regenerativ)	14,0 MWh	8,2 MWh	9,5 MWh	3,7 MWh	1,3 MWh
<i>Strekning med kontaktledning</i>					
Lengde	130 km	173 km	141 km	41 km	–
Energi	3,6 MWh	5,9 MWh	4,5 MWh	1,1 MWh	–
Energi (regenerativ)	2,9 MWh	4,4 MWh	3,5 MWh	1,0 MWh	–



Figur 72: Økonomisk vurdering av forskjellige teknologier for Nordlandsbanen. Alle kostnader er i 2015-kroner.



Figur 73: Økonomisk vurdering av forskjellige teknologier for Rørosbanen. Alle kostnader er i 2015-kroner.

Hydrogen virker med dagens teknologistand til å være det beste alternativet, gjerne i hybridisert form. Energikostnader er noe høyere enn for batteri fordi den sammensatte virkningsgraden til brenselceller og hydrogenstasjoner er lavere enn batterienes, men investeringene er til gjengjeld mindre fordi systemet er billigere og har lengre levetid.

Fremtidig utvikling peker mot en økning i marginen de nye teknologiene har allerede i dag over diesel og KL, som vil øke raskest fram til 2021 for så å konvergere mot en årlig kostnad på 100 millioner, som er henholdsvis 3 og 6 ganger billigere enn diesel og KL; mesteparten derav vil bestå av lokomotivvedlikehold og energikostnader.

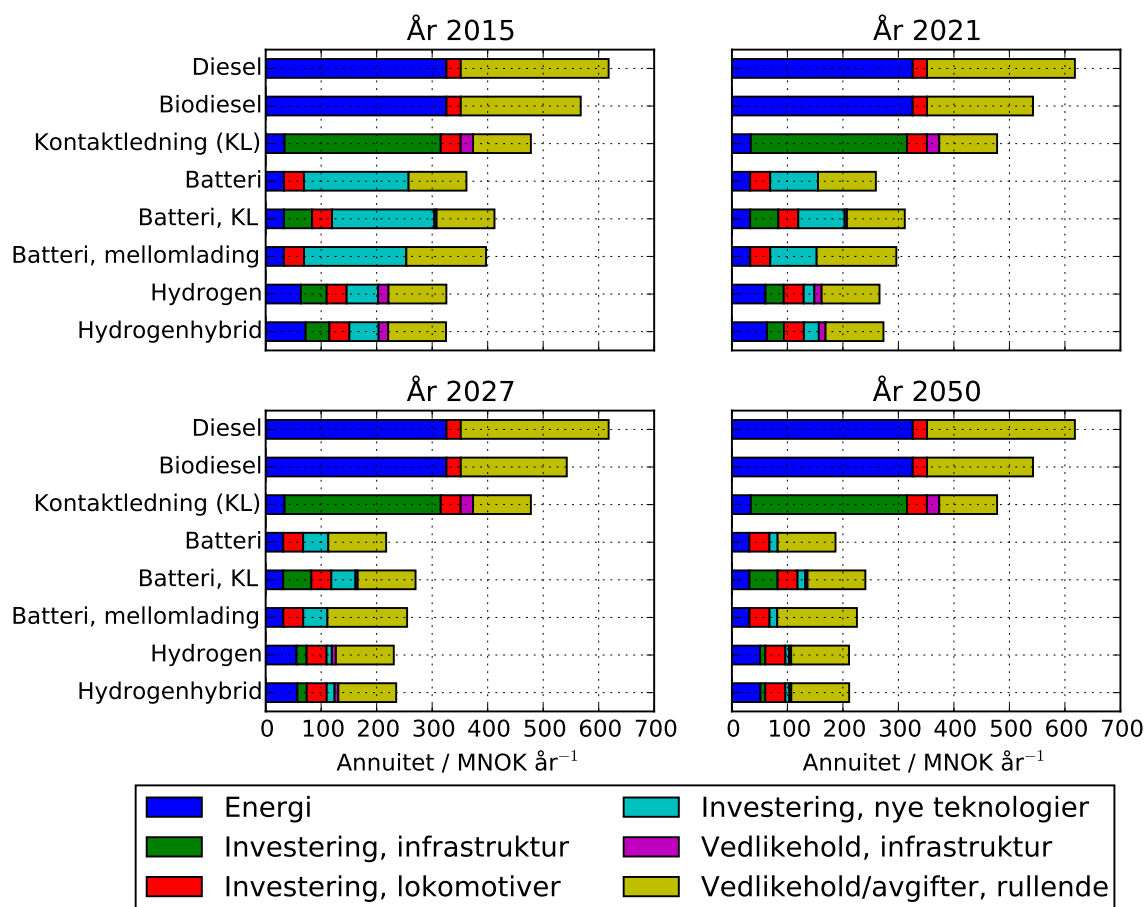
IIb.3.6.2 Rørosbanen

For Rørosbanen antas det 10 lokomotiver og 20 togbevegelser per arbeidsdag mellom Trondheim og Alnabru, med 300 arbeidsdager i året. Resultatene er vist i figur 73.

På grunn av den større trafikkmengden og noe kortere avstand, er kontaktledning et konkurransedyktig alternativ til dieseldrift.

Som for Nordlandsbanen, kan det spares noen titalls millioner per år på å innføre biodiesel, men alternative teknologier er enda billigere.

Utviklingen ligner på Nordlandsbanen, der hydrogen er noe bedre med dagens teknologistand, mens batteri- og hydrogenløsninger konvergerer til cirka 150 millioner per år mot 2050.



Figur 74: Økonomisk vurdering av forskjellige teknologier for Røros- og Solørbanen. Alle kostnader er i 2015-kroner.

IIb.3.6.3 Røros- og Solørbanen

For dette tilfellet regnes det med samme trafikk som for Rørosbanen alene (som nå kjører isteden over Kongsvinger), samt 6 flere lokomotiver og 4 togbevegelser per dag som representerer tømmeretog fra Østerdalen til Sverige. Østerdalen representeres av Koppang stasjon og Sverige av Charlottenlund stasjon.

Resultatene vist i figur 74 ligner som forventet veldig mye på Rørosbanen, selv om tallene er større på grunn av flere tog og lengre ikke-elektrifisert strekning; de samme kvalitative betraktninger gjelder.

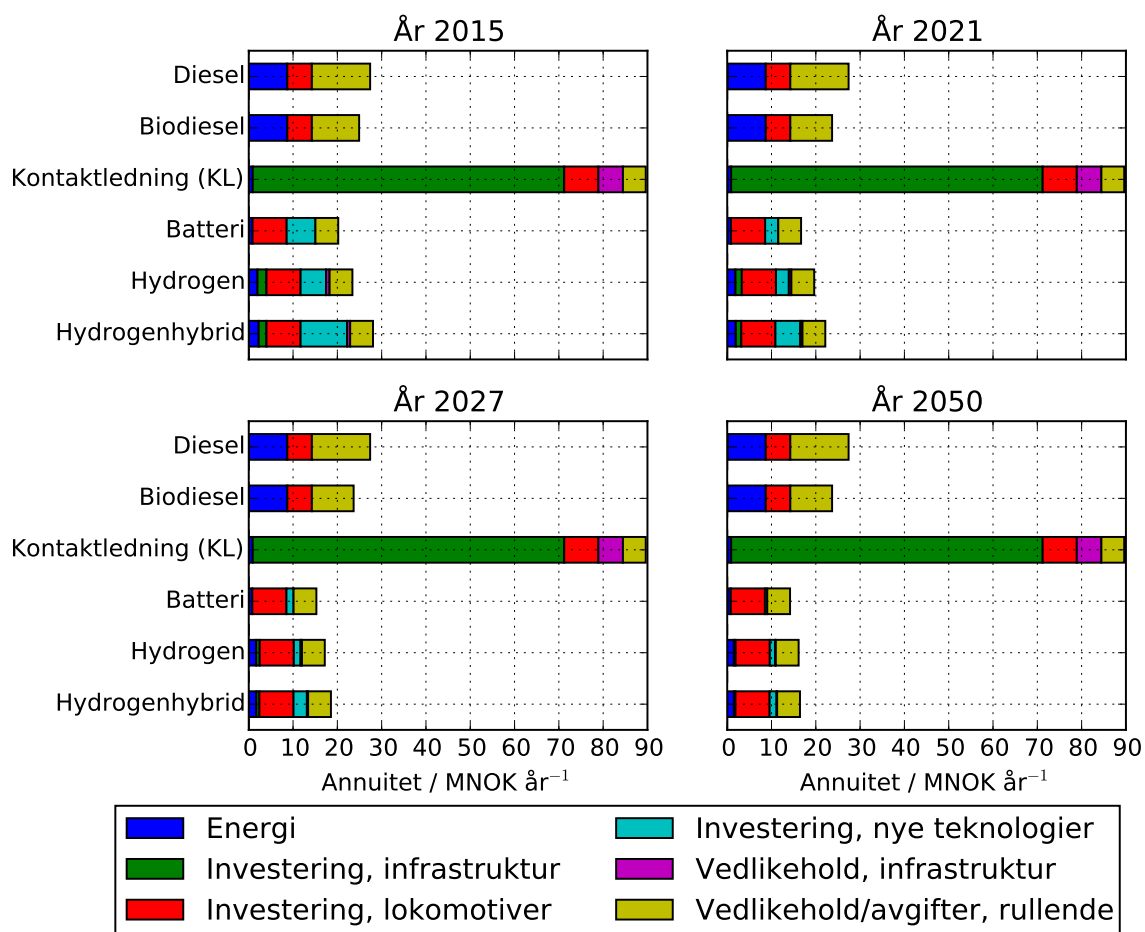
IIb.3.6.4 Raumabanen

For Raumabanen vurderes et scenario med 3 lokomotiver og 6 togbevegelser per dag. På grunn av den korte strekningen, vurderes ikke løsningene med batterimellomading for Raumabanen.

Figur 75 viser at kontaktledning er mye dyrere enn diesel. Samtidig er det ikke stor forskjell mellom diesel, biodiesel og de nye teknologiene, mest fordi kostnadene i dette tilfellet domineres av investeringer, med få og korte togbevegelser. Energikostnadene, som er størst for diesel, er i dette tilfellet derfor begrenset av den lave utnyttelsen av materiellet.

I motsetning til de andre banene, er batteriløsningen noe bedre enn hydrogen med dagens teknologi: dette er fordi energieffektiviteten er bedre enn for hydrogen, samt at det ikke er nødvendig med store investeringer siden én batterivogn er tilstrekkelig for den korte avstanden, og den lave materielle utnyttelse forlenger batterienes levetid.

Energikostnader for batteri og hydrogen er svært lave; faktisk utgjør investering og vedlikehold av lokomo-



Figur 75: Økonomisk vurdering av forskjellige teknologier for Raumabanen. Alle kostnader er i 2015-kroner.

tivene mesteparten av kostnadene etter år 2027.

IIb.4 Konklusjoner

Analysene i denne rapporten viser at hydrogen- og batteridrevne godstog er betydelig billigere enn dagens dieseltog for de fleste ikke-elektrifiserte baner i Norge.

KL er desidert det dyreste alternativet for Nordlandsbanen, mens det er litt billigere enn diesel for Røros- og Solørbanen. Også for Raumabanen er KL dyrest, i tillegg til å være ugunstig av hensyn til turismen.

Biodiesel er en lettvinnt måte å redusere kostnadene knyttet til diesel på, forutsatt at særavgiften for dieseltog reduseres i takt med utslippsreduksjonen.

Naturgass ble ikke økonomisk vurdert, da det er stor usikkerhet rundt dens pris og leveransebetingelser; diesel ville være alternativet som ligner mest på naturgass, og for diesel er den største kostnaden knyttet nettopp til drivstoffprisen. Det er dessuten viktig at naturgass ikke vil være like fleksibel som diesel, da drivstofftankene vil kunne fylles der flytende naturgass er tilgjengelig, gjerne i forbindelse med en havn (Trondheim, Bodø, Åndalsnes).

Batteri- og hydrogenetog leverer for de fleste baner de mest konkurransedyktige alternativene, med små forskjeller seg imellom, og har stort forbedringspotensial fram til 2050.

Mulighetene for mellomlading av batteriene viser seg å være ugunstige, da disse forkorter batterienes levetid og krever yppigere reinvesteringer.

Det er vanskelig å spå nøyaktig den teknologiske utviklingen fram til 2050, og det er derfor usikkert om

Tabell 26: Investeringer og levetider for de mest aktuelle alternativene for Rørosbanen, med data for 2015. Obs! Tabellen tar hensyn kun til investeringer, ikke til driftskostnader, herunder energikostnadene.

	Investering	Levetid	Annuitetsfaktor	Annuitet
Diesel				
10 lokomotiver	225,9 MNOK	20 år	13,6	16,6 MNOK
Kontaktledning				
KL-anlegg	7620 MNOK	75 år	23,8	320 MNOK
10 lokomotiver	314,1 MNOK	20 år	13,6	23,1 MNOK
Batteritog				
10 lokomotiver	314,1 MNOK	20 år	13,6	23,1 MNOK
Batterier	276 MNOK	2,1 år	1,96	141 MNOK
Hydrogentog				
10 lokomotiver	314,1 MNOK	20 år	13,6	23,1 MNOK
Brenselceller	113 MNOK	3,7 år	3,35	33,7 MNOK
Hydrogenlagring	92 MNOK	20 år	13,6	6,8 MNOK
Fyllestasjon (19 MW)	333 MNOK	10 år	8,1	41,1 MNOK

hydrogen eller batteri vil være den beste løsningen i det lange løp.

Samtidig som levetiden til hydrogen- og batterivogner kortere enn for et KL-anlegg, så innebærer en investering i en bestemt teknologi ikke en like stor forpliktelse. Det er altså enklere å “ombestemme seg”, og det er liten teknologisk innlåsning.

Tabell 26 gjengir investeringsbildet for de mest aktuelle teknologiene for Rørosbanen i 2015, utvalgt som et representativt eksempel: spesielt batterier har veldig kort levetid.

Videre, utelukker batteri og hydrogen ikke hverandre: kostnadene knyttet til disse er nærmest utelukkende i rullende materiell, med relativt sett svært begrensede infrastrukturkostnader.

Det anbefales derfor at det satses både på batteri- og hydrogentog (gjerne i hybridisert form) og at Jernbaneverket følger med på den teknologiske utviklingen fortløpende for å skaffe seg den riktige kompetansen uansett utfallet av den teknologiske utviklingen fremover.

Referanser

- [1] Jernbaneverket. *Slik fungerer jernbanen: en presentasjon av trafikksystemets infrastruktur*. Jernbaneverket. Okt. 2012. URL: http://www.jernbaneverket.no/contentassets/55a947e1337748beaee3839e8f34f806/slikfungererjernbanen_2012_web_oppsl.pdf.
- [2] Jernbane.net. *Nordlandsbanen*. URL: http://www.jernbane.net/norge/langslinjen/nordland/ny_index.asp.
- [3] NRK Nordland. *Distriktsnyheter Nordland, 26. august 2014 (3:12–3:30)*. Aug. 2014. URL: <https://tv.nrk.no/serie/distriktsnyheter-nordland/DKN099082614/26-08-2014>.
- [4] NSB-Konsernet. *Miljøregnskap 2012*. Tekn. rapp. Norges Statsbaner, 2012. URL: http://www.nsbkonsernet.no/no/miljo-og-samfunn/miljoeregnskap/_attachment/4761.
- [5] Harald Thune-Larsen, Anne Madslie og Jan Lindjord. *Energieffektivitet og utslipp i transport*. Tekn. rapp. 1078/1997. Oslo: Transportøkonomisk Institutt, okt. 1997. URL: <https://www.toi.no/getfile.php/Publikasjoner/T%C3%83%C2%98I-notater/1997/1078-1997/1078-97-elektronisk.pdf>.
- [6] Hydrogenics. *Heavy Duty Fuel Cell Power Module*. 2013. URL: <http://www.hydrogenics.com/docs/default-source/default-document-library/hypm-hd180-specsheet-2013-r1.pdf?sfvrsn=0>.
- [7] Robert Edwards mfl. *JEC Well-to-wheel analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context*. Tekn. rapp. European Commission, 2014. DOI: doi:10.2790/95533. URL: http://iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/sites/iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/files/documents/tw_report_v4a_march_2014_final.pdf.
- [8] Vindportalen. *Vindturbinenes virkningsgrad*. Jul. 2014. URL: <http://www.vindportalen.no/teori/virkningsgrad.aspx>.
- [9] Jernbaneverket. *Miljørapport 2012*. URL: <http://miljorapport2012.jernbaneverket.no/>.
- [10] Diesel.net. *Nonroad Engines*. 2014. URL: <https://www.dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php#rail>.
- [11] Rita Kleven og Stein Lorentzen. "Største satsing på tog på 50 år". I: *NRK* (mar. 2013). URL: <http://www.nrk.no/trondelag/elektrifiserer-jernbanen-1.10970218>.
- [12] NetworkRail. *On-track trials of prototype battery-powered train begin*. Aug. 2014. URL: <http://www.networkrail.co.uk/news/2014/aug/On-track-trials-of-prototype-battery-powered-train-begin/>.
- [13] Geir Bjarte Hjetland og Oddleif Løset. *Verdas første elektriske bilferje på veg ut frå verftet—snart er den i drift på Sognefjorden*. NRK. Apr. 2014. URL: <http://www.nrk.no/sognogfjordane/verdas-forste-batteriferje-pa-veg-1.11669337>.
- [14] Ingvald (CEO Fjord Line) Fardal. *ONS2014-foredrag*. (Day 2). Aug. 2014. URL: <http://stream.mtsserver.no/ons/centrecourt.html>.
- [15] National Post. *Natural gas-powered locomotive drives CN into eco-friendly(er) future*. Sep. 2012. URL: <http://news.nationalpost.com/news/canada/natural-gas-powered-locomotive-drives-cn-into-eco-friendlyer-future>.
- [16] GE Transportation. *Celebrating National Train Day*. Mai 2014. URL: <http://www.getransportation.com/blog/celebrating-national-train-day>.
- [17] Jernbaneverker. *Bruk av biodiesel ved jernbanene i Norge*. Tekn. rapp. 2006. URL: <http://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/155405>.
- [18] Wikipedia. *Second-generation biofuels*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Second-generation_biofuels.
- [19] Pål Börjesson mfl. *Dagens och framtidens hållbara biodrivmedel*. Tekn. rapp. The Swedish Knowledge Centre for Renewable Transportation Fuels, 2013. URL: http://www.f3centre.se/projects/s-project/fff_hallbara_drivmedel.
- [20] Wikipedia. *Biodiesel: Railway usage*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Biodiesel#Railway_usage.
- [21] Bryan Sims. *Amtrak presents details on year-long Heartland Flyer B20 trial*. Nov. 2011. URL: <http://www.biodieselmagazine.com/articles/8156/amtrak-presents-details-on-year-long-heartland-flyer-b20-trial>.
- [22] Matheson Gas Products. *Lower and Upper Explosive Limits for Flammable Gases and Vapors*. URL: [https://www.mathesongas.com/pdfs/products/Lower-\(LEL\)-&-Upper-\(UEL\)-Explosive-Limits-.pdf](https://www.mathesongas.com/pdfs/products/Lower-(LEL)-&-Upper-(UEL)-Explosive-Limits-.pdf).
- [23] Regjeringen. *TEN-T retningslinjer*. Nov. 2011. URL: <https://www.regjeringen.no/no/sub/eos-notatbasen/notatene/2011/nov/ten-t-retningslinjer/id682405/>.
- [24] European Commission. *Infrastructure - TEN-T - Connecting Europe*. URL: <http://ec.europa.eu/transport/themes/infrastructure/ten-t-guidelines/corridors/>.
- [25] IEA. *World Key Energy Statistics*. Tekn. rapp. 2014. URL: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2014.pdf>.
- [26] Eurostat. URL: <http://ec.europa.eu/eurostat>.
- [27] European Commission. *Roadmap to a Single European Transport Area: Towards a competitive and resource efficient transport system*. Tekn. rapp. 2011.
- [28] ERTRAC. *Energy Carriers for Powertrains*. Tekn. rapp. 2014. URL: http://www.ngvaeurope.eu/downloads/news/Roadmap_Energy_carriers_for_powertrains.pdf.
- [29] COWI. *State of the Art on Alternative Fuels Transport Systems*. Tekn. rapp. utkast til sluttrapport, endelig rapport ikke tilgjengelig enda. Prosjeksjoner er utviklet ved hjelp av PRIMES-TREMOVE modellen av E3M-Lab (ICCS/NTUA). 2015.
- [30] Nordic Energy Research og IEA. *Nordic Energy Technology Perspectives*. Tekn. rapp. 2013. URL: <http://www.nordicenergy.org/wp-content/uploads/2012/03/Nordic-Energy-Technology-Perspectives.pdf>.

- [31] Statistisk Sentralbyrå. *Utslipp av klimagasser, 1990-2013, endelige tall*. Jan. 2015. URL: <https://www.ssb.no/natur-og-miljo/statistikker/klimagassn/aar-endelige>.
- [32] RailWayPro. *Target 2050—Zero carbon emissions in railway transport*. URL: <http://www.railwaypro.com/wp/target-2050-zero-carbon-emissions-in-railway-transport/>.
- [33] European Expert Group on Future Transport Fuels. *First Report*. Tekn. rapp. 2011. URL: <http://ec.europa.eu/transport/themes/urban/cts/doc/2011-01-25-future-transport-fuels-report.pdf>.
- [34] European Commission. *Transport 2050: Commission outlines ambitious plan to increase mobility and reduce emissions*. Mar. 2011. URL: http://europa.eu/rapid/press-release_IP-11-372_en.htm.
- [35] John Deere. *Understanding Emission Regulations*. URL: http://www.deere.com/en_US/services_and_support/engine-information/understanding-emission-regulations/understanding-emission-regulations.page.
- [36] Tine Sundtoft. *Ny utslippsforpliktelse for 2030 -en felles løsning med EU*. Mai 2015. URL: <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/ny-utslippsforpliktelse-for-2030/id2397859/>.
- [37] Stig Schjølset. *Velkommen til EUs klimaboble*. Feb. 2015. URL: <http://energiogklima.no/kommentar/velkommen-til-eus-klimaboble/>.
- [38] European Commission. *The EU Emissions Trading System (EU ETS)*. 2015. URL: http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/index_en.htm.
- [39] IEA. *Railway Handbook*. 2012.
- [40] I: *Tetsudō Daiya Jōhō Magazine (Japan: Kōtsū Shimbun)* 39.312 (apr. 2010), s. 124.
- [41] Will Nichols. "Low carbon battery-powered train carries first passengers". I: *BusinessGreen* (jan. 2015). URL: <http://m.businessgreen.com/bg/news/2389928/low-carbon-battery-powered-train-carries-first-passengers>.
- [42] "Fuel cells to power regional trainsets". I: *Railway Gazette* (sep. 2014). URL: <http://www.railwaygazette.com/news/technology/single-view/view/fuel-cells-to-power-regional-trainsets.html>.
- [43] Jerry M Mendel. "General type-2 fuzzy logic systems made simple: a tutorial". I: *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on* 22.5 (2014), s. 1162–1182.
- [44] Jacob Spendelow og Jason Marcinkoski. *Fuel Cell System Cost – 2013*. Tekn. rapp. Record 14012. US Department of Energy, jun. 2014. URL: http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/14012_fuel_cell_system_cost_2013.pdf.
- [45] Arvid Bårdstu. *Måler opp for høyere tog*. Jun. 2014. URL: <http://www.jernbaneverket.no/Nyheter/Jernbanemagasinet/Nyhet/Maler-opp-for-hoyere-tog/>.
- [46] Per Erlien Dalløkken. *Det finnes ingen nullutslippsbiler*. Teknisk Ukeblad. Jun. 2011. URL: <http://www.tu.no/industri/motor/2011/06/14/det-finnes-ingen-nullutslippsbiler>.
- [47] Ian Skinner mfl. *Railways and Biofuel*. Tekn. rapp. Association of Train Operating Companies, jul. 2007.
- [48] Hexagon Composites. *Smartstore*. URL: <http://www.hexagonlincoln.com/product-lines/smartstore/smartstore>.
- [49] CHIC project. *Clean Hydrogen in European Cities*. URL: <http://chic-project.eu/about-us>.
- [50] *H2moves Scandinavia*. URL: <http://www.scandinavianhydrogen.org/h2moves>.
- [51] Klaus Scheuerer. *Transport Energy Strategy (TES) and Clean Energy Partnership (CEP) Berlin – Signposts for a sustainable mobility*. Feb. 2008. URL: http://www.iphe.net/docs/Meetings/Germany_2-08/Transport_Applications.pdf.
- [52] Helge Fosshem. *Fortegnelse over godsvogner, vekslebeholdere, containere og fløskasser*. Tekn. rapp. G-72. NSB Gods Materiell, 2000.
- [53] Bombardier. *TRAXX, Europe's Choice for Rail Transportation of Freight and Passengers*. URL: <http://www.bombardier.com/en/transportation/products-services/rail-vehicles/locomotives/traxx.html>.
- [54] Mikael Sjöholm. "Benefits of regenerative braking and eco driving for high-speed trains: Energy consumption and brake wear". I: *KTH MSc thesis* (2011). URL: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-31701>.
- [55] Howell – DoE. *The EV Everywhere Challenge*. Tekn. rapp. US Department of Energy, 2013. URL: http://energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f15/APR13_Energy_Storage_c_II_EV_Everywhere_1.pdf.
- [56] Peter Spiess. *Fahrdynamik des Schienenverkehrs*. Tysk. Die Bahn. 2005. URL: http://www.ids.uni-hannover.de/fileadmin/IDS/ids_lehre/SFZ/Fahrdynamik_2006.pdf.
- [57] Erik Bjørn Grønning Lindgreen og Spencer C. Sorenson. *Driving Resistance from Railroad Trains*. Tekn. rapp. Deliverable D7 in the Artemis project. Technical University of Denmark (DTU), 2005. URL: http://www.inrets.fr/fileadmin/ur/lte/artemis/non_road4/Artemis_del7b_rail.pdf.
- [58] Henning Wahlquist, Tor Homleid og Annegrete Bruvoll. *Metodehåndbok — Samfunnsøkonomiske analyser for jernbanen 2015*. Jernbaneverket. 2015. URL: <http://www.jernbaneverket.no/no/dokumenter/2015/marked/leverandorinfo/Metodehåndbok-2015/>.
- [59] *Produktmøkkeltall 2013*. Jernbaneverket Banedivisjonen, Okt. 2014.
- [60] Lars Ole Valøen og Mark I. Shoesmith. "The effect of PHEV and HEV duty cycles on battery and battery pack performance". I: *PHEV 2007 Conference*. 2007, s. 4–5. URL: http://web.archive.org/web/20090326150713/http://www.pluginhighway.ca/PHEV2007/proceedings/PluginHwy_PHEV2007_PaperReviewed_Valoan.pdf.
- [61] Christopher Guzy. "Fuel Cell Electric Bus (FCEB) - Status & Future". I: *ZBus Regulation and Technology Summit*. Sep. 2013. URL: http://www.arb.ca.gov/msprog/bus/zbus/workshop/2b_Guzy.pdf.

- [62] Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. *Fuel Cell Technologies Office Multi-Year Research, Development, and Demonstration Plan*. Tekn. rapp. US Department of Energy, 2014. URL: <http://energy.gov/eere/fuelcells/downloads/fuel-cell-technologies-office-multi-year-research-development-and-22>.
- [63] Ned Stetson. *Hydrogen Storage Sub-Program Overview*. Tekn. rapp. DoE Hydrogen og Fuel Cells Program, 2014. URL: http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/progress14/iv_0_stetson_2014.pdf.
- [64] M. Melaina og M. Penev. *Hydrogen Station Cost Estimates*. Tekn. rapp. NREL/TP-5400-56412. National Renewable Energy Laboratory, sep. 2013. URL: <http://www.nrel.gov/docs/fy13osti/56412.pdf>.
- [65] Paul Inge Dahl mfl. *Hydrogen for transport from renewable energy in Mid-Norway*. Tekn. rapp. Transnova, mai 2013. URL: http://www.transnova.no/wp-content/uploads/2012/07/H2iMidtNorge_Sluttrapport.pdf.
- [66] Jon Brede Dukan. *Elektrifisering av Trønder- og Meråkerbanen*. Jernbaneverket. Feb. 2015. URL: <http://www.jernbaneverket.no/contentassets/7676d715396d44f98ad591c3cedb138d/8.-infrastrukturprosjekter---leverandordag-energi-20150203.pdf>.
- [67] Johannes Børstad og Kjetil Skaufel. *Alle bruene er for lave*. NRK. Jul. 2014. URL: <http://www.nrk.no/trondelag/alle-bruene-er-for-lave-1.11813042>.
- [68] European Commission. *Transport 2050: The major challenges, the key measures*. Mar. 2011. URL: http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-11-197_en.htm.

Vedlegg

A Deltakere ved workshops

A.1 Workshop 20. juni 2014

Brede Nerموen	JBV Teknologi
Johan Anton Wikander	JBV Infrastruktur/ Signal og tele
Frank Martinsen	JBV Teknologi/ Elkraft
Bjørn Ukkestad	JBV Teknologi/ Regelverk og spesifikasjoner
Ragnhild Wahl	JBV Teknologi/ FoU og strategi
Alf Helge Løhren	JBV Teknologi/ Baneteknikk
Kjell Ivar Maudal	JBV Trafikk og marked/ Terminaler
Thor Brækkan	JBV Infrastruktur/ Område nord
Kristine Jessen	JBV Infrastruktur/ Område midt
Tor Nicolaisen	JBV Strategi og samfunn
Heidi Meyer Midtun	JBV Strategi og samfunn
Steffen Møller-Holst	SINTEF, Materialer og kjemi, H ₂ - og brenselcelleteknologi
Magnus Thomassen	SINTEF, Materialer og kjemi, Batteri og H ₂ -teknologi
Federico Zenith	SINTEF IKT, Regulering, prosesskontroll
Bernd Wittgens	SINTEF, Materialer og kjemi, Biodrivstoff, prosess-teknologi
Magnar Hernes	SINTEF Energi, Elkraftsystemer
Dag Stenersen	SINTEF Marintek, Naturgass forbrenningsmotor
Odd André Hjelkrem	SINTEF Teknologi og Samfunn, Miljøanalyser

A.2 Workshop 3. september 2014

Terje Stømer	JBV Infrastruktur/ Energi
Johan Anton Wikander	JBV Infrastruktur/ Signal og tele
Bjørn Ukkestad	JBV Teknologi/ Regelverk og spesifikasjoner
Alf Helge Løhren	JBV Teknologi/ Baneteknikk
Frank Martinsen	JBV Teknologi/ Elkraft
Kjell Ivar Maudal	JBV Trafikk og marked/ Terminaler
Anne Skomli	JBV Strategi og samfunn
Anne Gudrun Mork	JBV Strategi og samfunn
Kjell Kanstad	NSB Materiell
Terje Ekrann	NSB Materiell
Bjarne Ivar Wist	CargoNet
Tor Nicolaisen	JBV Strategi og samfunn
Ragnhild Wahl	JBV Teknologi/ FOU og strategi
Heidi Meyer Midtun	JBV Strategi og samfunn
Steffen Møller-Holst	SINTEF, Materialer og kjemi, H ₂ - og brenselcelleteknologi
Magnus Thomassen	SINTEF, Materialer og kjemi, Batteri- og H ₂ -teknologi
Federico Zenith	SINTEF IKT, Regulering, prosesskontroll
Magnar Hernes	SINTEF Energi, Elkraftsystemer
Dag Stenersen	SINTEF Marintek, Naturgass forbrenningsmotor

A.3 Workshop 9. mai 2015

Steffen Møller-Holst	SINTEF Materialer og kjemi
----------------------	----------------------------

Tor Johan Nicolaisen	JBV Strategi nord og midt
Ragnhild Wahl	JBV Teknologi
Heidi Meyer Midtun	JBV Strategi nord og midt
Lise Nyvold	JBV Strategi nord og midt
Jan Christian Andreassen	JBV Energi, plan og prosjekt
Johan Anton Wikander	JBV CTC og relebasert sikringsanlegg
Bjørn Ukkestad	JBV Teknologi Regelverk og spesifikasjoner
Kaja Voss	JBV Strategi Samfunnsøkonomi og statistikk
Frank Tormod Martinsen	JBV Teknologi Elkraft
Per Fjeldal	JBV Styringsstab Sikkerhet og miljø
Hans Erik Wiig	JBV Trafikk og teknikk
Atle Gundersen	JBV Teknologi Kontroll, styring og signal
Christoph Siedler	JBV Strategi Samfunnsøkonomi og statistikk
Sjur Helseth	JBV Strategi Øst
Ove Tovås	JBV Strategi Kapasitet
Anne Gudrun Mork	JBV Strategi nord og midt
Alf Helge Løhren	JBV Teknologi Baneteknikk
Kjell Ivar Maudal	JBV Terminaler
Michael Andersen Brendås	JBV Strategi Øst
Steinar Høisæter	JBV Teknologi Regelverk og spesifikasjoner
Jan S Hagen	JBV Elektro Røros- og Solørbanen
Bjørn Egede-Nissen	JBV Strategi Øst
Terje Stømer	JBV Energi

B Underlag for beregning av kapasitet for batterier/hydrogen

Som underlag for beregninger av lastekapasitet for batterier og hydrogentanker er informasjon fra Jernbaneverket benyttet⁴². Boggi godsvogner er gjerne tilpasset godset de er beregnet på f.eks. standard konteinerlengder og i regelen kortere enn personvogner (som er 26,4 m, RIC-standard). NSBs standard RIV boggi åpne godsvogner var 20,74 m som trolig også er en representativ verdi for Europa. Ofte kan også vekten av godset begrense hvilken størrelse det er behov for. For å begrense toglengde og vekt bygges ikke godsvogner større enn godsvolumet tilsier. RIV-vogner kan også være 2-akslete siden dette er billig å bygge og gir lav egenvekt, samtidig som det er godt nok i godsvognhastigheter. Vedlagt noen eksempler på NSB/CargoNet RIV- godsvogntyper.

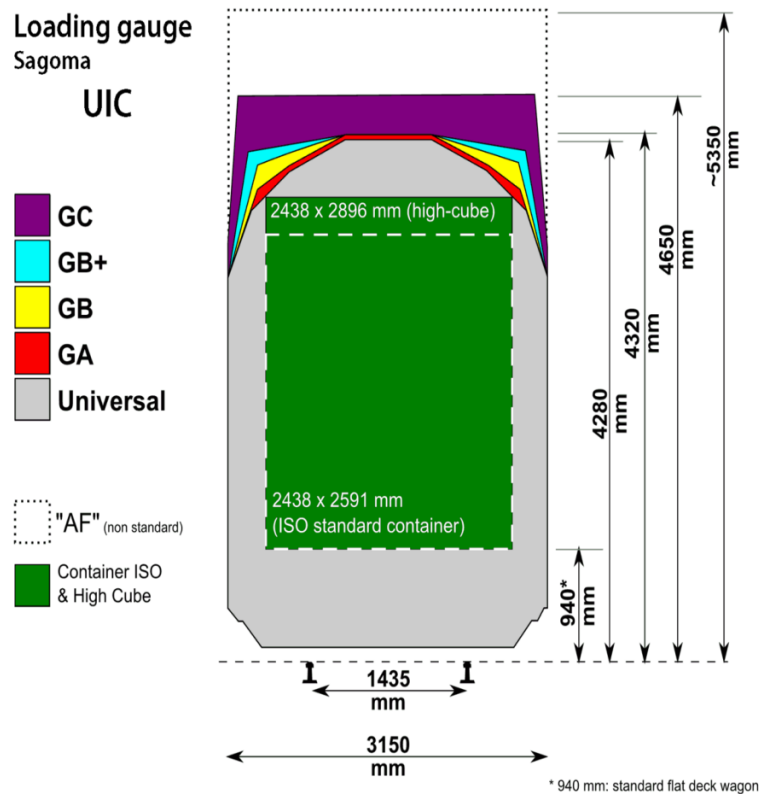
- Lengde var 20 tonn akseltrykk standard, men i dag bygges godsvogner standard for (minst) 22,5 tonns akseltrykk. Framtidig mål for Europa er 25 tonn. En 2-akslet containervogn veier gjerne 10-11 tonn, mens en boggivogn veier det dobbelte. Overbygde vogner er noe tyngre. Vogner er gjerne nøyere dimensjonert de siste årene hvilket da i stedet kan tas ut som økt lasteevne.

Lasteevnen vil være differansen mellom vekt og maks vekt ut fra akseltrykk, men det er i regelen restriksjoner på lastfordelingen, dvs. selv om en 2-akslet containervogn kan laste 34 tonn kan dette ikke være en konsentrert last midt på.

I denne grovanalysen er evalueringen av caset for Nordlandsbanen basert på følgende antakelser:

- Beregningene er foretatt for et godstog med 20 vogner og godskapasiteten holdes konstant
- Standard 2-akslet containervogn er benyttet (ISO standard):
 - Volum tilgjengelig for gods: 125 m³ antatt containertverrsnitt (se figur 76).

⁴²Bjørn Ukkestad, Enhetsleder Rullende materiell (ERR), Teknologi, Regelverk & spesifikasjoner, 11. november 2014



Figur 76: Standard mål for godsvogn, og konteinerdimensjoner.

- Lastekapasitet per godsvogn er 34 tonn (totalvekt 45 tonn minus tomvekt 11 tonn)
- Godsvognenes lengde antas å være 20 meter.
- Felles for de elektriske fremdriftskonseptene (batteri-, hydrogen- og elektriske tog (KL))
 - Benytter samme lokomotiv for med trekkraft for lokomotiv 5400 kW
- Energitetthet for dagens batteriteknologi er antatt å være 100 Wh/kg, og et optimistisk scenario for framtiden er denne anslått til å kunne øke til 200 Wh/kg
- For brenselceller er følgende antatt:
 - Effekttettheter på hhv 175 W/l og 250 W/kg (verdier for tilgjengelig kommersielt enhet)
 - Virkningsgrad på 50 % (fra hydrogen på tank til framdrift, konservativt estimat)
- Hydrogen lagres i gassform ved 350 bar i lettvekts komposittanker og det antas at:
 - Gassen lagres ved 350 bar hvilket gir en energitetthet på 25 kg/m³
 - 8 % (vekt) av lagringssystemets vekt er hydrogen
 - Et volum på 80 m³ (av de 125 m³ i konteiner) kan utnyttes til hydrogengass

C Transport 2050 Roadmap

For intercity travel: 50 % of all medium-distance passenger and freight transport should shift off the roads and onto rail and waterborne transport.

- By 2050, the majority of medium-distance passenger transport, about 300 km and beyond, should go by rail.
- By 2030, 30 % of road freight over 300 km should shift to other modes such as rail or waterborne transport, and more than 50 % by 2050.
- Deliver a fully functional and EU-wide core network of transport corridors, ensuring facilities for efficient transfer between transport modes (TEN-T core network) by 2030, with a high-quality high-capacity network by 2050 and a corresponding set of information services.
- By 2050, connect all core network airports to the rail network, preferably high-speed; ensure that all core seaports are sufficiently connected to the rail freight and, where possible, inland waterway system.
- By 2020, establish the framework for a European multimodal transport information, management and payment system, both for passengers and freight.
- Move towards full application of “user pays” and “polluter pays” principles and private sector engagement to eliminate distortions, generate revenues and ensure financing for future transport investments.

Transport 2050: The main measures [68]

The strategy outlined in the Transport 2050 Roadmap to a Single Transport Area aims to introduce profound structural changes to transform the transport sector.

It will move forwards in coming years (2011–14) with key measures:

- A major overhaul of the regulatory framework for rail (rail package 2012/2013). At the heart of the Transport 2050 roadmap is the need for a transformation in the rail sector so that it becomes more attractive and succeeds in carrying a very significantly increased share of the market for passenger and freight over middle distances (>300 km) by 2050. At the same time the aim is to triple the length of the current high-speed rail network by 2030. All this will require major changes to the regulatory framework for rail including: opening the market for domestic passenger services; introducing single management structures for rail freight corridors; a structural separation of infrastructure managers and service providers; improvements in the regulatory environment to make rail more attractive for private sector investment. The Commission will bring forward an ambitious package of legislative initiatives for the rail sector in 2012/2013.

The Commissions Rail Packages: http://ec.europa.eu/transport/modes/rail/index_en.htm.

D Vurdering av naturgass som alternativt drivstoff

Det er en rekke aspekter som må legges til grunn for vurdering av fossilbasert naturgass som alternativt drivstoff for ikke-elektrifiserte baner.

- Naturgass eliminerer så å si lokale utslipp (NO_x & PM)
- Naturgass gir 10–20 % reduksjon i CO₂-utslippet
- Naturgass er (per i dag) langt billigere enn diesel
- Naturgass omsettes i forbrenningsmotor:
 - lav effektivitet
 - lavere effekt enn elektriske lokomotiver
 - høyere trekraft enn elektriske lokomotiver

Da en relativt liten andel av godstrafikken på ikke-elektrifiserte baner foregår i urbane strøk, er lokale utslipp ikke av stor betydning. Mål om betydelige kutt i utslipp fra transportsektoren (60 % innen 2050) gjør at naturgass som erstatning for diesel ikke vil være en akseptabel løsning i et lengre tidsperspektiv. Lave priser på naturgass kan gi lavere driftskostnader sammenliknet med diesel, men avgifter på bruk av naturgass som drivstoff er allerede på vei inn, og nivået forventes å øke. Omsetning av naturgass i forbrenningsmotor begrenser effektiviteten til samme nivå som for diesel, mens effekt og trekkraft forblir på samme nivå som diesel. Basert på denne evaluering konkluderer SINTEF som følger:

- Naturgass gir marginale miljømessige fordeler sammenliknet m/diesel;
- Naturgass kan (inntil videre) gi lavere driftskostnader sammenliknet m/diesel;
- Naturgass gir kun én fordel sammenliknet med elektriske konsepter⁴³, høyere trekkraft (som for diesel);
- Rullende materiell for naturgass vil kunne benytte biogass som gir store miljøgevinster.

E Biogass som drivstoff

Det finnes en rekke biobaserte drivstoff (biogass, metanol, etanol, diesel m.fl.) som egner seg for anvendelse i transport. Blant disse ble det i dette prosjektet (i samråd med oppdragsgiver) valgt å se på biodiesel. Biogass representerer imidlertid også et interessant alternativ for jernbanedrift.

Biogass dannes ved nedbrytning biologisk materiale i fravær av oksygen. Biogass fremstilles bla fra avfall i landbruket, gjødsel (møkk), søppel, kloakk og matavfall.

Biogass består av omtrent like mengder metan (CH_4) og karbondioksid (CO_2). Vanligvis separeres CO_2 -delen fra, da den ikke bidrar til energiutnyttelsen. Ved tilsats av hydrogen, kan imidlertid CO_2 -delen omvandles til metan, slik at utbyttet av verdifull biogass kan doubles. Blant andre har det tyske industriselskapet Viessmann en utviklet en biologisk prosess som oppgraderer biogassen til tilnærmet ren metan (98 %).

Biogass kan omsettes i forbrenningsmotor og har mange likhetstrekk med naturgass. Konvensjonelle forbrenningsmotorer for naturgass kan med mindre justeringer omsette biogass. Sammenliknet med fossilbasert naturgass, anses karbonet i biogass som klimanøytralt da det i vesentlig grad har sin opprinnelse i biologisk materiale. Utnyttelse av biogass har i tillegg en gunstig klimateffekt gjennom at oppsamling og utnyttelse av biogass reduserer utslipp av metan til atmosfæren. Metan har en klimateffekt som er mer enn 20 ganger sterkere enn CO_2 .

I dag benyttes biogass i transport, bl.a. i busser i flere norske byer og i større lastebiler for varetransport. Tilgjengeligheten av biogass er per i dag begrenset. Biogassen som nå benyttes i rundt 100 av AtBs 200 gassbusser transporteres inntil videre fra Jönköping i Sverige til Trondheim i tankbil. Men det er betydelig aktivitet flere steder i Norge mht. å få satt i gang biogass-produksjon med drivstoffkvalitet også innenlands. Dermed forventes tilgangen av biogass som drivstoff å øke i tiden som kommer.

Biodiesel ble valgt ut som det alternativet blant biodrivstoffene som skulle inngå i analysene. Sammenliknet med biodiesel, har biogass den ulempe (på lik linje med naturgass) at det bør kjøles ned og kondenseres til flytende gass (LBG) for transport over lengre avstander. Denne prosessen er energikrevende og transporten fordrer isolerte gastanker. I forbrenningsprosessen har imidlertid biogassen den fordel at den (igjen på lik linje med naturgass) så og si eliminerer lokale utslipp (NO_x og partikler).

For anvendelse som drivstoff i jernbanedrift, anses derfor biogass som et meget interessant alternativ da biogass gir adskillig bedre klimagevinster enn fossilbasert naturgass, mens biogass ellers (etter oppgradering og rensing) har tilnærmet de samme egenskaper som fossilbasert naturgass. Innføring av avgift på bruk av fossilbasert naturgass i transport gjør at biogass også økonomisk vil kunne bli interessant, spesielt som erstatning for naturgass for aktører som i dag benytter naturgass i buss- og ferjedrift, men muligens også for jernbanedrift på ikke-elektrifiserte banestrekninger.

⁴³KL, Batteri, Hydrogen og hybrider av disse

F Nåverdi- og annuitetsmetoden

Bidrag av Kjetil Midthun, SINTEF Anvendt Økonomi

Nåverdimetoden benyttes for å vurdere lønnsomheten til investeringsprosjekter. Siden verdien av pengestrømmer er tidsavhengig, er det viktig å diskontere alle kontantstrømmer til ett basisår før de summeres. Diskonteringsraten som velges vil variere mellom selskap og investorer, og avhenger blant annet av mulig avkastning i alternative prosjekter, finansieringskostnader og risikoprofil.

Dersom to ulike prosjekter skal sammenlignes ved hjelp av nåverdimetoden, er det viktig at prosjektene er gjensidig utelukkende og at en har oversikt over konsekvenser for reinvesteringer og potensielle påvirkninger på eksisterende portefølje. For sammenligning av flere prosjekter vil det også kunne være gunstig å benytte andre kriterier i tillegg til nåverdimetoden, som for eksempel å beregne internrenten til prosjektene (*Internal rate of return*). I denne sammenhengen, hvor prosjektene utelukkende vil sammenlignes på basis av totale kostnader, er dette imidlertid mindre hensiktsmessig.

En annen utfordring med nåverdimetoden er knyttet til sammenligning av prosjekter med ulik levetid. En enkel sammenligning av nåverdien til prosjektene vil ikke gi riktig resultat dersom effekten av investeringene er ulik (for eksempel at prosjektene gir ulik driftstid). For å kunne sammenligne prosjektene må en da gjøre antagelser for reinvesteringer.

Den enkleste måten å gjøre dette på, er å anta at en kan investere i det samme prosjektet flere ganger (slik at summen av levetider for prosjektene blir like) med samme totale kostnader. I dette tilfellet vil en anta at det ikke forekommer teknologiutvikling mellom investeringstidspunktene som påvirker effektivitet og lønnsomhet. Alternativt kan en legge inn antagelser om hva teknologiutvikling vil bety for effektivitet og kostnader fram i tid (og eventuelt også ta med eventuelle kostnadsbesparelser knyttet til restverdi av den forrige investeringen).

Et viktig poeng her er også at en ved reinvesteringer kan velge å skifte til et annet fremdriftskonsept. Om en, for eksempel, har valgt mellom Teknologi A som har en levetid på 100 år, Teknologi B som har en levetid på 20 år og Teknologi C som har en levetid på 10 år, kan en, dersom Teknologi C er valgt for de første 10 årene deretter skifte til Teknologi B i neste periode (og så videre). Om en har valgt Teknologi A, er en derimot låst til dette valget (med mindre man vil avskrive hele investeringskostnaden). For å verdsette denne typen fleksibilitet er det imidlertid nødvendig å benytte realopsjonsteori og innhente mer detaljerte opplysninger om pris- og teknologiutvikling.

Forventninger til teknologi- og prisutvikling er uansett usikre og vil kunne påvirkes betydelig av teknologiske gjennombrudd som det er vanskelig og noen ganger tilnærmet umulig å forutse. Det er her viktig at forventningene er realistiske og faglig fundert i fysiske lover som gir absolutte begrensninger for eksempel mht. muligheter for å effektivisere prosesser.

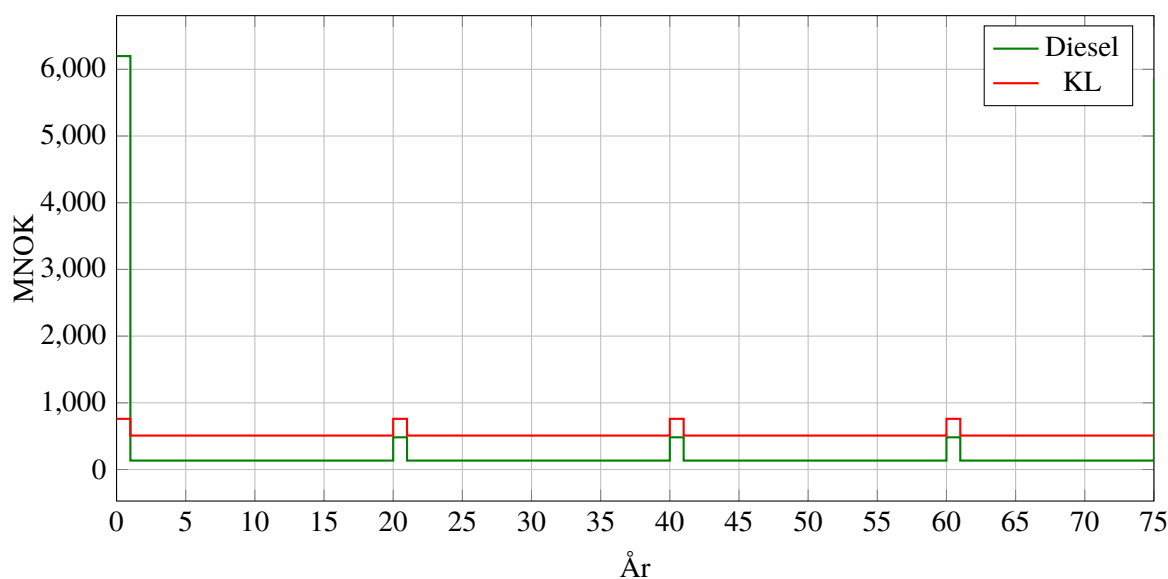
Et annet alternativ er å bruke **annuitetsmetoden**, hvor man finner en ekvivalent årlig kostnad til den nåverdien som er beregnet. Enkelt sagt kan denne beregnes i to trinn, hvor det første trinnet er å finne nåverdien for hvert enkelt prosjekt, og det andre trinnet er å spre denne nåverdien ut på levetiden til hvert enkelt prosjekt. Nåverdien spres ut slik at en får en lik årlig kostnad hvert år (som diskontert tilbake til basisåret gir den opprinnelige nåverdien). På denne måten vil en få sammenlignbare årlige kostnader for de prosjektene selv om disse har ulik levetid.

For å oppnå samme driftstid for de to prosjektene, må man her anta at man gjør reinvesteringer i nøyaktig det samme prosjektet tilstrekkelig antall ganger til at levetidene er like. Det betyr også at dersom en vil konvertere den ekvivalente årlige kostnaden til et sammenlignbart tall for nåverdi for de to prosjektene må en velge en felles driftstid som går opp i levetiden til de enkelte prosjektene.

Et annet alternativ er å anta at driftstiden er uendelig og estimere den totale kostnaden ved å dele den årlige kostnaden på diskonteringsraten. Gitt de to trinnene i beregningen av annuitetsmetoden skal denne gi resultater som er konsistente med nåverdimetoden.

Tabell 27: Data for sammenligning av KL-anlegg med dieseldrift for Rørosbanen.

	Elektrisk	Diesel
Investeringer		
10 lokomotiver (levetid 20 år)	349 MNOK	251 MNOK
KL-anlegg (levetid 75 år)	5715 MNOK	–
Årlige kostnader		
Energi og vedlikehold	134 MNOK	509 MNOK
NNV (75 år)	9259 MNOK	12478 MNOK
NNV (∞)	9975 MNOK	13169 MNOK
Annuitet	391 MNOK/år	527 MNOK/år


Figur 77: Kontantstrømmene for KL og dieseldrift over 75 år, med data for Rørosbanen fra tabell 27.

Regneeksempel

Som praktisk eksempel av forskjellene mellom nåverdi- og annuitetsmetoden vurderer vi kontaktledningsanlegg og dieseldrift på Rørosbanen, med investeringsdata som gitt i tabell 27.

Det er tydelig fra dataene at KL innebærer mye større langsiktige investeringer, mens diesel er dyrere i drift.

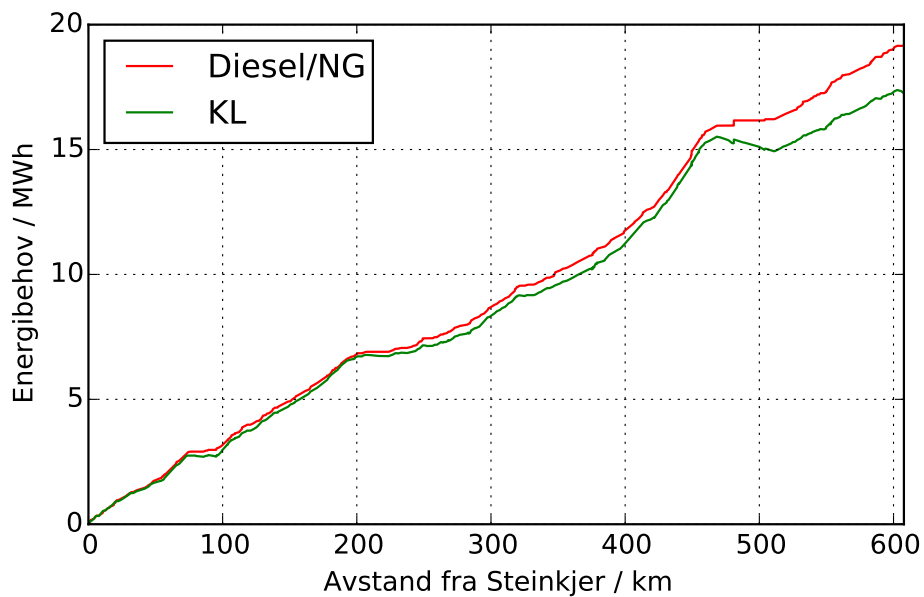
I figur 77 vises kontantstrømmene, som er veldig forskjellig utformet. Den store investering i KL-anlegget er synlig i det første året, samt reinvesteringer i lokomotiver hvert 20. år.

Kostnadene for KL er alltid lavere enn for diesel, med det store unntaket av det første året. Sammenligner vi disse investeringene med hensyn til nåverdi og annuitet, finner vi verdiene i tabell 27, som viser at KL-anlegg er en bedre investering enn diesel.

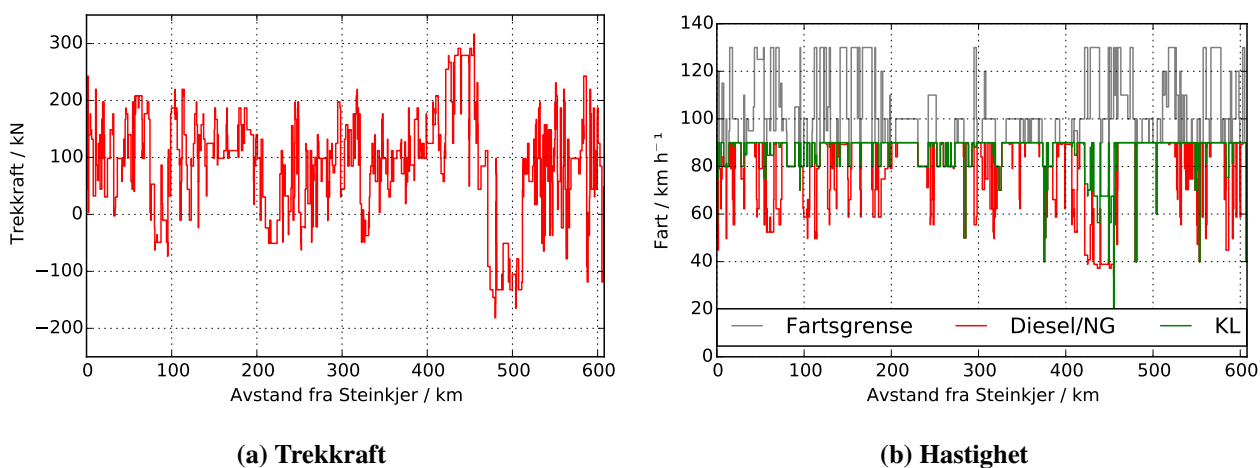
G Forlenget godstog

Det ble antatt gjennom hele rapporten at når en vogn legges i toget for å frakte batterier, hydrogen eller brenselceller, så skal godsseksjonen avkortes tilsvarende for å opprettholde togets lengde, slik at det ikke er nødvendig å forlenge kryssningssporene.

Som eksempel vises tilfellet for Nordlandsbanen, under antakelsen om at alle kryssningsspor forlenges til 750 m fra dagens 600 m.



Figur 78: Energi for et 750 m langt godstog over Nordlandsbanen.



(a) Trekkraft

(b) Hastighet

Figur 79: Trekkraft og hastighetsprofil for et 750 m langt godstog over Nordlandsbanen.

Energiprofilene for diesel og KL er vist i figurer 78. Som forventet er energibehovet noe større enn i figur 48.

Viktigere er det at trekraften nærmer seg 300 kN, som er den maksimale for el-lokomotivet CE 119, som vist i figur 79a.

Ingen av de alternative teknologier klarer å passere Saltfjellet, på grunn av sin ekstra vekt (batterier, hydrogenlagring osv.). KL-alternativet passerer toppen av Saltfjellet bare såvidt, og det er i praksis tvilsomt at ett elektrisk lokomotiv vil klare strekningen under alle forhold.

Hastighetsprofilene i figur 79b viser at diesel-lokomotiver, selv om de kan bestige Saltfjellet, må gjøre det på en hastighet under 40 km/h, som ville skape lange ventetider. Ellers reduseres den maksimale hastigheten som diesel kan oppnå betydelig flere steder langs Nordlandsbanen når man sammenligner med figur 47a.

H Antagelser

Dette avsnittet oppsummerer de forskjellige antagelser som er gjort i fase IIb.

H.1 Energi

- Biodiesel og naturgass omsettes i forbrenningsmotor, som ellers har samme egenskaper (lokomotivets vekt, trekraft, osv.) som diesel.
- Godsvogner fjernes fra toget når batteri- eller hydrogenvogner skal legges til, slik at togets samlede lengde beholdes konstant; godsvognenes vekt avtar proporsjonalt med avkortet lengde.
- Lokomotivene kan alltid yte sin starttrekkraft: dette neglisjerer f.eks. isdannelse på skinnene, som er et kjent problem på Saltfjellet.
- Regenerativ bremsing er 50 % effektiv fra regenerering til gjenbruk.
- All strøm til hydrogenproduksjon og batterilading kommer fra fornybare energikilder.
- Regelverk for alternative teknologier er tilgjengelig, og hindrer ikke transport av større mengder komprimert hydrogen ved 35 MPa.
- Toget utsettes kun for stige-, rulle- og luftmotstand; alle andre typer motstand neglisjeres.
- Akselerasjon er momentant når fartsgrensen endres.
- For passasjertransport over Raumabanen er sammenligningen mellom et FLIRT-tog og *tre* Typ-93 motorvogn, for å oppnå noenlunde lik størrelse; det er likevel enkelte Typ-93 motorvogn som kjører Raumabanen i dag.
- Beregningen av kjøretiden tar ikke hensyn til annen trafikk på banen.

H.2 Økokomi

- Godstransport er dimensjonerende for jernbanen.
- Bombardier TRAXX MS (som kan kjøre både AC fra KL og DC fra batteri eller brenselceller) har samme pris som TRAXX AC, som CargoNet benytter.
- Dollarkurs er 7,5 NOK.
- For å kompensere redusert nyttelast, økes antall årlige avganger: dette øker energi- og vedlikeholdskostnader, men andre kostnader (lønn osv.) er ikke med.

- KL-anlegg har en fast kilometerkostnad på 15 MNOK/km.
- Dieselpriis er konstant for alle scenarier, 13 NOK/l.
- Miljøavgiften for diesel avtar proporsjonalt med CO₂-utslipp når man går over til biodiesel.
- Lokomotiv byttes ikke ved overgang mellom ikke-elektrifisert og elektrifisert bane, selv om det kunne være aktuelt ved enkelte stasjoner med teknisk avdeling, som Dombås.
- Koppang er et representativt utgangspunkt for tømmeretog fra Østerdalen til Sverige.

I Akronymer og begreper

AC Vekselstrøm, gjerne ved samme spenning og frekvens som i det norske jernbanenettet (15 kV og 16 $\frac{2}{3}$ Hz).

Annuitet Virtuell årlig kostnad utover en investerings levetid, som tilsvarer investeringskostnad ved prosjektstart. Avhenger av rentesats og levetid.

Batterivogn Vogn som brukes til frakt av batterier som leverer energi til togets framdrift.

Brenselcelle Elektrokjemisk innretning som kan konvertere kjemisk energi, gjerne i form av hydrogen, direkte til strøm.

Bufferbatteri Relativt lite batteri som brukes til kortsiktig utjevning av lasten.

DC Likestrøm, gjerne ved standard-spenningen for jernbane 3 kV.

Diesel-elektrisk Lokomotiv med stor diesel(forbrennings)motor og generator som genererer elektrisitet som igjen fordeles til elektriske motorer på lokomotivets akslinger. Disse lokomotivene har ikke noen batteripakke ombord som kan lagre energi, og kan derfor ikke regenerere (gjenbruke) bremseenergi. Disse er dermed ikke å regne som hybrider.

EU28 De 28 medlemsland i den Europeiske Unionen.

HDV "Heavy-Duty Vehicle", som lastebiler og vogntog.

Hybrid Et hybridtog er et tog som har et ladbart energilager ombord mellom den energikonverterende enheten og framdriftsmotorene knyttet til hjulene. Sammenliknet med Diesel-elektriske lokomotiver har Diesel-hybridene altså mulighet for å ivareta bremseenergi og lagre denne i batterier til senere anvendelse for framdrift eller annet behov for elektrisitet. Den energikonverterende enheten i tog har så langt i all hovedsak vært en stor forbrenningsmotor med diesel som drivstoff, men andre drivstoff er også mulig (biodrivstoff, naturgass og hydrogen). Sistnevnte benyttes mest effektivt i brenselceller (se Hydrogen nedenfor).

Hybridvogn Vogn som frakter hydrogensylindrer til lagring, brenselceller og batteri, og leverer strøm til framdrift av toget; energien er primært lagret i hydrogen, og batteriene brukes som buffer.

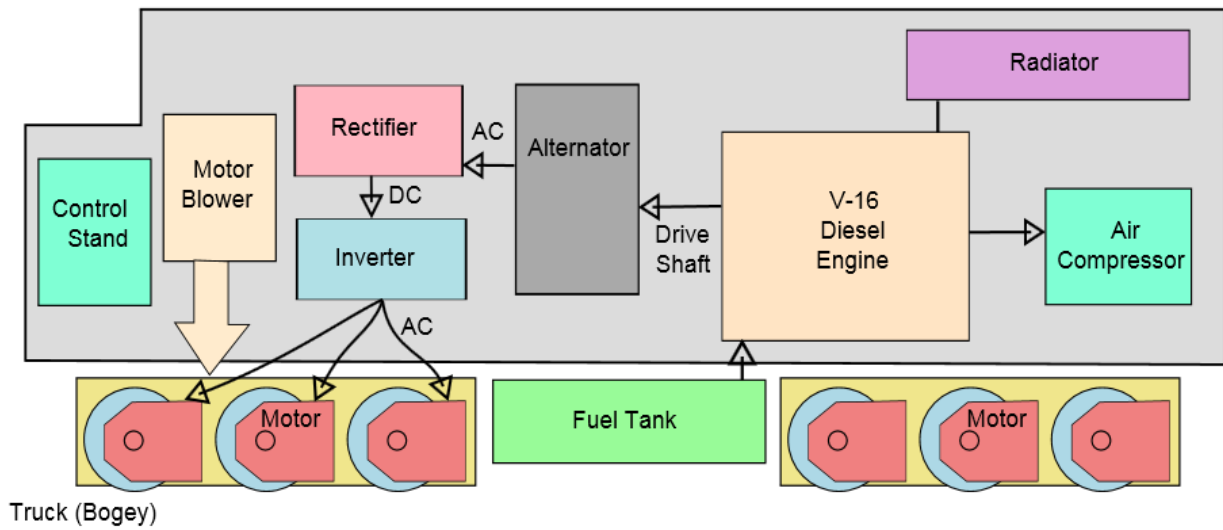
Hydrogenvogn Vogn som frakter hydrogensylindrer til lagring og brenselceller, og leverer strøm til framdrift av toget.

IPCC "Intergovernmental Panel on Climate Change", en internasjonal institusjon opprettet av FN.

KL Kontaktledning, også ment som forkortelse for kontaktledningsanlegg.

LNG Engelsk "Liquified Natural Gas", eller flytende naturgass.

MTOE Megatonn-olje ekvivalenter, energienhet som tilsvarer 41 868 TJ eller 11,63 TWh.



SCHEMATIC DIAGRAM OF MODERN U.S. DIESEL ELECTRIC LOCOMOTIVE

- Engines may be V-12, V-16 or V-20
- Engine drives either an alternator (AC) or generator (DC)
- Traction motors are either DC or AC
- Motor blower blows air over traction motors to cool them

NBS De åtte nordiske og baltiske land: Norge, Sverige, Danmark, Island, Finland, Estland, Latvia og Litauen.

NGVA Natural and bioGas Vehicle Association.

NNV Netto nåverdi, summen av diskonterte inntekter og kostnader i løpet av en investerings levetid.

NTP Nasjonal Transportplan, utarbeidet av regjeringen.

PEM Engelsk “Proton-Exchange Membrane” (protonvekslingsmembran), eller også “Polymer Electrolyte Membrane” (polymerelektrolyttmembran); betegner den mest utbredte typer brenselceller i bruk i dag, som opererer under 100 °C og tilnærmet atmosfærisk trykk.

railML En filformat for å beskrive jernbanenett, derivert fra XML.

TEN-T Trans-European Transport Network.

XML eXtensible Markup Language, en generisk filformat.



Teknologi for et bedre samfunn
www.sintef.no