



Jernbane-  
direktoratet

# Alternativanalyse

Vedlegg 6 KVV GREEN

Dokument nr: 202300894-12

Dato: 03.10.2023

<b>Utarbeidet av</b> Jernbanedirektoratet i samarbeid med WSP	<b>Saksnummer</b> 202300894
<b>Godkjent av</b> Jernbanedirektoratet	<b>Dokumentnummer</b> 202300894-12
<b>Dato</b> 03.10.23	<b>Versjon</b> 2
<b>Endringslogg:</b> 03.10.23: Det er gjort endringer i beregning av kostnad pr tonn redusert CO2 utslipp ved at CO2 prissetting ekskluderes i telleren i brøken. Gir vesentlige utslag i tiltakskostnaden.	

# Innhold

<b>1</b>	<b>Metodebeskrivelse</b>	<b>9</b>
1.1	Forutsetninger for alternativanalysen	9
1.2	Evalueringskriterier	9
1.2.1	Effektmåloppnåelse	9
1.2.2	Økonomi	10
1.2.3	Ikke-prissatte virkninger	10
1.2.4	Følsomhet/risiko	11
1.2.5	Helhetlige betraktninger	11
1.3	Analysemodell	11
1.4	Simuleringer	11
<b>2</b>	<b>Beskrivelse av konsepter, alternativer og togtilbudet</b>	<b>13</b>
2.1	Togtilbudet i referansealternativ	13
2.1.1	Nordlandsbanen	15
2.1.2	Rørosbanen (med Solørbanen)	18
2.1.3	Raumabanen	19
2.2	Sikkerhet på jernbanen	19
2.2.1	Godkjenning av nye kjøretøy	19
<b>3</b>	<b>Alternativ 0 – Fossil diesel</b>	<b>22</b>
3.1	Beskrivelse av energibærer	22
3.1.1	Innblanding av biodrivstoff i fossil diesel	22
3.2	Infrastruktur	23
3.3	Kjøretøyflåten	24
3.4	Tekniske løsninger som er lagt til grunn i referansealternativet	25
3.5	Teknologisk modenhet og forventet utviklingsløp	25
3.6	Konsekvenser for togtrafikken	25
3.7	Kostnader	26
3.8	Oppnåelse av effektmål	27
3.8.1	Reduserte klimagassutslipp innen 2030	27
3.8.2	Reduserte klimagassutslipp innen 2050	27
3.8.3	Energieffektivitet	27
3.8.4	Togtilbudets attraktivitet	28
3.8.5	Oppsummering av alternativets effektmåloppnåelse	28
3.9	Tilfredsstillelse av rammebetingelser	29
<b>4</b>	<b>Alternativ 1a – Ikke-fossil diesel</b>	<b>30</b>
4.1	Beskrivelse av energibærer	30
4.2	Tiltaksbehov i infrastrukturen	31
4.3	Tiltaksbehov i kjøretøyflåten	31
4.4	Tekniske løsninger som er lagt til grunn i alternativanalysen	31
4.5	Teknologisk modenhet og forventet utviklingsløp	31
4.6	Konsekvenser for togtrafikken	33
4.7	Mulig tidsplan for innføring av alternativet	33
4.8	Kostnader	33
4.9	Oppnåelse av effektmål	33
4.9.1	Reduserte klimagassutslipp innen 2030	34
4.9.2	Reduserte klimagassutslipp innen 2050	35
4.9.3	Energieffektivitet	35
4.9.4	Togtilbudets attraktivitet	35
4.9.5	Oppsummering av alternativets effektmåloppnåelse	35
4.10	Tilfredsstillelse av rammebetingelser	35

4.11	Oppsummering.....	36
<b>5</b>	<b>Alternativ 1b – Ikke-fossil diesel med del-elektrifisering.....</b>	<b>37</b>
5.1	Beskrivelse av energibærer.....	37
5.2	Drøfting.....	37
5.3	Oppsummering.....	37
<b>6</b>	<b>Alternativ 2a – Hydrogen.....</b>	<b>38</b>
6.1	Beskrivelse av energibærer.....	38
6.1.1	Om hydrogen.....	39
6.1.2	Hydrogen som energibærer for jernbane.....	40
6.2	Tiltaksbehov i infrastrukturen.....	41
6.2.1	Fyllestasjon.....	41
6.2.2	Plassering av fyllestasjoner.....	43
6.2.3	Sikkerhetstiltak på fyllestasjoner.....	45
6.2.4	Tilgang til fyllestasjoner og tomteklargjøring.....	45
6.2.5	Energibehov og tomtestørrelser for fylleanlegg.....	46
6.2.6	Tiltak i verksted.....	46
6.3	Tiltaksbehov i kjøretøyflåten.....	47
6.4	Tekniske løsninger som er lagt til grunn i alternativanalysen.....	47
6.4.1	Kjøretøy med hydrogen som energibærer.....	47
6.4.2	Personkjøretøy med hydrogen som energibærer.....	47
6.4.3	Godskjøretøy med hydrogen som energibærer.....	48
6.4.4	Antall kjøretøy.....	49
6.4.5	Fyllestasjoner for hydrogen.....	49
6.5	Teknologisk modenhet og forventet utviklingsløp.....	49
6.5.1	Hydrogenteknologi for hydrogenkjøretøy.....	49
6.5.2	Hydrogenteknologi for motorvognsett (persontog).....	50
6.5.3	Lokomotiver for gods- og persontrafikken.....	50
6.5.4	Oppsummering.....	51
6.6	Samfunnssikkerhet og tilfredstillelse av lover og forskrifter.....	51
6.6.1	Transport av hydrogen på jernbane.....	53
6.6.2	Fyllestasjoner for hydrogen.....	53
6.7	Konsekvenser for togtrafikken.....	55
6.7.1	Tanking.....	55
6.7.2	Driftsopplegg.....	55
6.7.3	Robusthet i rutemodell og omløpstid.....	55
6.7.4	Endring i togframføringstid.....	56
6.8	Mulig tidsplan for innføring av alternativet.....	56
6.8.1	Beslutningsprosess.....	56
6.8.2	Planlegging.....	56
6.8.3	Bygging.....	57
6.8.4	Anskaffelse av kjøretøy.....	57
6.9	Kostnader.....	58
6.10	Oppnåelse av effektmål.....	59
6.10.1	Reduserte klimagassutslipp innen 2030.....	59
6.10.2	Reduserte klimagassutslipp innen 2050.....	60
6.10.3	Energieffektivitet.....	60
6.10.4	Forbruk av knappe ressurser.....	61
6.10.5	Togtilbudets attraktivitet.....	61
6.10.6	Oppsummering av alternativets effektmåloppnåelse.....	62
6.11	Tilfredsstillelse av rammebetingelser.....	62
<b>7</b>	<b>Alternativ 2b – Hydrogen med del-elektrifisering.....</b>	<b>66</b>
7.1	Beskrivelse av energibærer.....	66
7.2	Tekniske løsninger som er lagt til grunn i alternativanalysen.....	67
7.2.1	Kjøretøy med hydrogen og kontaktledning som energibærer.....	67

7.2.2	Fyllestasjoner for hydrogen .....	67
7.2.3	Plassering av fyllestasjoner .....	67
7.2.4	Sikkerhetstiltak på fyllestasjoner .....	67
7.2.5	Sidespor til fyllestasjoner .....	67
7.2.6	Verksted og beredskapstiltak for hydrogen.....	67
7.2.7	Del-elektrifisering.....	67
7.3	Tiltak i infrastrukturen .....	71
7.4	Tiltak i kjøretøyflåten .....	71
7.5	Teknologisk modenhet og forventet utviklingsløp .....	71
7.6	Samfunnssikkerhet og tilfredstillelse av lover og forskrifter.....	71
7.7	Konsekvenser for togtrafikken .....	71
7.8	Mulig tidsplan for innføring av alternativet.....	72
7.9	Kostnader.....	72
7.10	Oppnåelse av effektmål.....	74
7.10.1	Reduserte klimagassutslipp innen 2030.....	74
7.10.2	Reduserte klimagassutslipp innen 2050.....	74
7.10.3	Energieffektivitet.....	74
7.10.4	Togtilbudets attraktivitet .....	74
7.10.5	Oppsummering av alternativets effektmåloppnåelse .....	74
7.11	Tilfredsstillelse av rammebetingelser (hydrogen med del-elektrifisering) .....	75
<b>8</b>	<b>Alternativ 3 – Batteri.....</b>	<b>76</b>
8.1	Beskrivelse av energibærer .....	76
8.1.1	Prinsipper for lading i stillstand.....	77
8.1.2	Prinsipper for lading i bevegelse .....	78
8.1.3	Prinsipper for batteribytte .....	78
8.2	Tekniske løsninger som er lagt til grunn i alternativanalysen.....	79
8.2.1	Lade infrastruktur og tilpasning til kjøretøykategorier .....	79
8.2.2	Batteriteknologi.....	79
8.2.3	Omformerstasjoner .....	80
8.2.4	Kontaktledningsanlegg .....	80
8.3	Tiltak i infrastrukturen .....	80
8.3.1	Simuleringene .....	81
8.3.2	Del-elektrifisering av Nordlandsbanen.....	81
8.3.3	Del-elektrifisering av Raumabanen.....	82
8.3.4	Delelektrifisering av Rørosbanen .....	83
8.3.5	Delelektrifisering av Solørbanen .....	84
8.3.6	Samlet delelektrifisering av alle banestrekninger.....	84
8.4	Tiltak i kjøretøyflåten .....	85
8.5	Teknologisk modenhet og forventet utviklingsløp .....	86
8.5.1	Batteriteknologi for jernbanekjøretøy.....	86
8.5.2	Batteriteknologi for motorvogner (persontog).....	88
8.5.3	Batteriteknologi for lokomotiver for gods- og persontog .....	90
8.5.4	Konklusjon .....	94
8.6	Samfunnssikkerhet og tilfredstillelse av lover og forskrifter.....	94
8.6.1	Sikkerhetsrisiko .....	94
8.6.2	Reduksjon av sannsynlighet .....	96
8.6.3	Reduksjon av konsekvens .....	96
8.6.4	Tilfredstillelse av lover og forskrifter .....	96
8.6.5	3R-vurdering .....	98
8.6.6	Tilpasning av verksteder .....	99
8.6.7	Oppsummering.....	99
8.7	Konsekvenser for togtrafikken .....	100
8.7.1	Driftsopplegg.....	100
8.7.2	Endring i togframføringstid.....	100
8.7.3	Robusthet i rutemodell og omløpstid for godstog .....	100
8.7.4	Standardisering av kjøretøyflåten .....	100

8.7.5	Trafikk uten bytte av lokomotiv .....	101
8.7.6	Sårbarhet ved ekstremtilfeller av norsk klima eller uforutsette hendelser .....	101
8.7.7	Endret vedlikehold av kjøretøyflåten .....	101
8.7.8	Behov for andre fagmiljøer .....	102
8.7.9	Togtrafikk i driftsfase .....	102
8.8	Mulig tidsplan for innføring av alternativet .....	102
8.8.1	Beslutningsprosess .....	102
8.8.2	Planlegging .....	102
8.8.3	Bygging .....	103
8.8.4	Anskaffelse av kjøretøy .....	103
8.8.5	Mulige pilotprosjekter .....	104
8.9	Kostnader .....	105
8.10	Oppnåelse av effektmål .....	106
8.10.1	Reduserte klimagassutslipp innen 2030 .....	106
8.10.2	Reduserte klimagassutslipp innen 2050 .....	107
8.10.3	Energieffektivitet .....	107
8.10.4	Togtilbudets attraktivitet .....	108
8.10.5	Samlet oversikt over effektmåloppnåelse .....	110
8.11	Tilfredsstillelse av rammebetingelser .....	111
<b>9</b>	<b>Alternativ 4 – Elektrifisering .....</b>	<b>114</b>
9.1	Beskrivelse av energibærer .....	114
9.1.1	Nærmere beskrivelse av det tekniske systemet .....	114
9.2	Tekniske løsninger som er lagt til grunn i alternativanalysen .....	115
9.2.1	Tekniske løsninger for elektrifisering av tunneler .....	115
9.2.2	Vurdering av transformatorstype .....	119
9.2.3	Vurdering av spenning og frekvens på kontaktledningsanlegget .....	119
9.3	Tiltak i infrastrukturen .....	120
9.3.1	Omformerstasjoner .....	123
9.3.2	Kontaktledningsanlegg .....	125
9.3.3	Utvidelse av tunnelprofil .....	125
9.3.4	Ombygging/heving av overgangsbruer .....	126
9.3.5	Ombygging av fagverksbruer på jernbanen .....	127
9.4	Tiltak i kjøretøyflåten .....	128
9.5	Teknologisk modenhet og forventet utviklingsløp .....	128
9.6	Samfunnssikkerhet og tilfredsstillelse av lover og forskrifter .....	129
9.7	Konsekvenser for togtrafikken .....	129
9.7.1	Kortere framføringstid og/eller bedre punktlighet .....	130
9.7.2	Økt kapasitet, evt. retningsdrift for godstog Hamar-Støren .....	130
9.7.3	Nettverksstruktur gir økt robusthet og fleksibilitet .....	131
9.7.4	Enklere og rimeligere vedlikehold av kjøretøyflåten .....	131
9.7.5	Enhetlig og mer fleksibel kjøretøyflåte .....	132
9.7.6	Mer robuste fagmiljøer .....	132
9.8	Mulig tidsplan for innføring av alternativet .....	132
9.8.1	Beslutningsprosess .....	132
9.8.2	Planlegging .....	133
9.8.3	Bygging .....	133
9.8.4	Anskaffelse av kjøretøy .....	134
9.8.5	Mulige pilotprosjekter .....	135
9.9	Kostnader .....	135
9.10	Oppnåelse av effektmål .....	136
9.10.1	Reduserte klimagassutslipp innen 2030 .....	136
9.10.2	Reduserte klimagassutslipp innen 2050 .....	136
9.10.3	Energieffektivitet .....	137
9.10.4	Togtilbudets attraktivitet .....	137
9.10.5	Oppsummering av alternativets effektmåloppnåelse .....	139
9.11	Tilfredsstillelse av rammebetingelser .....	139

<b>10 Samfunnsøkonomisk analyse</b> .....	<b>141</b>
10.1 Nordlandsbanen.....	142
10.2 Røros- og Solørbanen.....	143
10.3 Raumabanen.....	144
10.4 Banestrekningene samlet.....	145
10.5 Følsomhetsanalyser.....	145
10.6 Rangering Nordlandsbanen.....	148
10.7 Rangering Røros- og Solørbanen.....	148
10.8 Rangering Raumabanen.....	149
<b>11 Oppsummering av kostnader og effektmåloppnåelse</b> .....	<b>150</b>
11.1 Kostnader.....	150
11.1.1 Anskaffelseskostnader kjøretøy.....	150
11.1.2 Investeringskostnader infrastruktur.....	150
11.1.3 Driftskostnader kjøretøy.....	151
11.1.4 Driftskostnader infrastruktur.....	151
11.1.5 Energikostnader.....	151
11.2 Effektmåloppnåelse.....	152
11.2.1 Reduserte klimagassutslipp innen 2030.....	152
11.2.2 Reduserte klimagassutslipp innen 2050.....	152
11.2.3 Energieffektivitet.....	153
11.2.4 Togtilbudets attraktivitet.....	154
11.2.5 Oppsummering av effektmåloppnåelse.....	154
<b>12 Oppsummering av teknologisk modenhet</b> .....	<b>156</b>
<b>13 Arbeidsmaskiner og skiftelokomotiver</b> .....	<b>157</b>
13.1 Arbeidsmaskiner og skiftelokomotiver på den norske jernbanen.....	157
13.2 Muligheter for utslippsreduksjoner fra arbeidsmaskiner og skiftelokomotiver.....	159
13.2.1 Relevante funn fra NULLFIB2.....	159
13.2.2 Arbeidsverksted om arbeidsmaskiner i KVU GREEN.....	160
13.2.3 RFI i KVU GREEN.....	165
13.2.4 Sammendrag av identifiserte tiltak for utslippsreduksjoner fra arbeidsmaskiner og skiftelokomotiver.....	166
13.3 Teknologisk modenhet og tilgjengelighet i markedet.....	167
13.4 Konsekvenser for arbeidsmaskiner og skiftelokomotiver ved innføring av alternativene for person- og godstog på de ikke-elektrifiserte strekningene.....	170
13.4.1 Alternativ 0 Fossil diesel.....	170
13.4.2 Alternativ 2a Hydrogen og 2b Hydrogen med del-elektrifisering.....	171
13.4.3 Alternativ 3 Batteri.....	172
13.4.4 Alternativ 4 Elektrifisering.....	174
13.5 Tilfredsstillende rammebetingelser.....	175
13.6 Tidsperspektiv.....	176
13.7 Sammendrag arbeidsmaskiner og skiftelokomotiver.....	176
13.7.1 Arbeidsmaskiner.....	176
13.7.2 Skiftelokomotiver.....	178
13.7.3 Tiltak som kan bidra til utslippsreduksjoner uten skifte av energibærer.....	178
13.7.4 Påvirkning på oppnåelse av effektmål.....	179
<b>14 Vedlegg</b> .....	<b>180</b>
14.1 Underlagsrapport grunnkalkyle (UNNTATT OFFENTLIGHET).....	180
14.2 Notat om forutsetninger for analyse av alternativer.....	180
14.3 Usikkerhetsanalyse (UNNTATT OFFENTLIGHET).....	180
14.4 Energisimulering.....	180
14.5 Samfunnsøkonomisk analyse.....	180
14.6 Jernbanedirektoratets referansealternativ.....	180
14.7 Standard togtyper i referansealternativet.....	180

14.8	Underlagsnotat om infrastrukturforutsetninger i KVV GREEN.....	180
14.9	Arealbeslag og kostnader for hydrogendepoter.....	180
<b>15</b>	<b>Kilder og referanser.....</b>	<b>181</b>
<b>16</b>	<b>Rettinger og hendelser etter at rapporten kom 18.september 2023.....</b>	<b>183</b>



# 1 Metodebeskrivelse



Figur 1 Arbeidsprosess i konseptvalgutredningen

Alternativanalysen tar utgangspunkt i de aktuelle alternativene som gjenstår etter mulighetsstudien.

## 1.1 Forutsetninger for alternativanalysen

For persontogslinjene analysert i dette arbeid er det utarbeidet forskjellige mal-tog av Jernbanedirektoratet. Dette er kjøretøytyper som er representative for den trafikken som kjøres, og hvor disse mal-togene brukes av forskjellige toglinjer. I beregningen av investeringskostnader for kjøretøy er det for persontogene brukt samme investeringskostnad for regiontog som for regiontog i distrikt. Dette skyldes at de mangler prisobservasjoner for de korte regiontog i distrikt, og hvor det også er uklart hvor stor prisforskjellen vil være mot regiontog. Samtidig er det i energisimuleringene simulert med regiontog i distrikt for de linjer som har slike mal-tog. Det betyr at det er et avvik mellom energisimuleringer og kostnadsberegninger for de toglinjer som bruker regiontog i distrikt.

Se vedlagte notat om forutsetninger for analyse av alternativer.

## 1.2 Evalueringskriterier

### 1.2.1 Effektmåloppnåelse

*Effektmål 1 og 2 (E1 og E2) – Jernbanen skal bidra til at transportsektorens utslipp reduseres med minst 55 % innen 2030 og 90-95% innen 2050.*

Det gjøres beregninger av endring i utslipp CO<sub>2</sub>-ekvivalenter i jernbanesektoren, inkludert økt trafikk.

Ettersom jernbanesektoren slipper ut svært lite klimagasser totalt sett sammenlignet med resten av transportsektoren per i dag, er det viktig at tiltak som skal bidra til å kutte jernbanesektorens utslipp ikke flytter trafikk over til transportformer som gir høyere totalt utslipp. Aktuelle løsninger som skal redusere jernbanens eget utslipp bør bidra til reduserte klimagassutslipp i transportsektoren som helhet. Utredningens hovedfokus er reduksjon i klimagassutslipp fra jernbanen.

*Effektmål 3 (E3) - Mer effektiv bruk av samfunnets samlede energiresurser*

For å bidra til reduksjon i jernbanenes og samfunnets samlede behov for energi, er et effektmål at fremtidige energibærere skal bidra til mer effektiv bruk av samfunnets samlede energiresurser. «Well-to-wheel» vil derfor brukes som et effektmål for å måle den mest effektive bruken av samfunnets samlede energiresurser. Det kan også være aktuelt å skille «wheel-to-tank» og «tank-to-wheel» om det viser seg at teknologien har veldig ulik modenhet og usikkerhet i de forskjellige delene av energikjeden.

Videre er det viktig at omstilling av jernbanen til lav- og nullutslippsløsninger ikke bruker en uforholdsmessig stor andel av knappe energikilder som kan være nødvendig for omstilling i andre sektorer.

#### Effektmål 4 (E4) – Ivareta togtilbudets attraktivitet

Følgende indikatorer er valgt for å måle alternativenes oppfyllelse av attraktivitetskriteriet:

1. Togenes akselerasjonsevne
2. Togenes trekkraft
3. Togets aksellast kan realisere hastigheter iht. overbygningsklasse C [1].
4. Ulemper for togtilbudet som følge av lade-og-tankestopp, blant annet ladetider, kapasitetsrestriksjoner ved ladepunktet og bindinger i ruteplanlegging til ladestopp.
5. Konsekvenser for effektiv tog lengde, blant annet lengdemeter i toget som går bort til energilager og dermed ikke kan brukes til reisende eller gods

I praksis er det slik at egenskaper ved kjøretøyene, slik som akselerasjonsevne og trekkraft kan benyttes til å realisere en kombinasjon av bedre punktlighet, kortere togframføringstid, trafikkapasitet og så videre, men at med en gitt infrastruktur og en gitt kjøretøyflåte, kan man ikke maksimere alle samtidig. For eksempel kan bytte til et kjøretøy med bedre akselerasjonsevne benyttes til å øke punktligheten innenfor en gitt rute, eller man kan prioritere lavere framføringstid i stedet – eventuelt litt av begge.

I tabellene for effektmåloppnåelse for de ulike konseptene benyttes det både fargekoder og +/- for å forenkle lesbarheten av vurderingene. Gult/O betyr likt som i referanse, mørkere grønn og flere + betyr økende grad av bedre måloppnåelse enn referansealternativet og mørkere oransje/rød – betyr lavere grad av måloppnåelse enn referansealternativet + eller – i parentes indikerer en halv skår av + eller – uten parentes.

#### 1.2.2 Økonomi

De økonomiske estimatene i utredningen fremkommer på følgende grunnlag:

1. Grunnkalkyle, som er basert på forskjellige tilgjengelige kilder. Konseptenes forskjeller i modenhetsnivå medfører at kildebruk og usikkerhet i kalkylene varierer mellom alternativene.
2. Usikkerhetsanalyse, som har fastsatt forventede kostnader for de aktuelle alternative løsningene. Det er gjennomført usikkerhetsanalyse for investeringskostnader gjennom to iterasjoner hvor et bredt spekter av fagpersoner har medvirket. I tillegg er det gjennomført en usikkerhetsanalyse for vedlikeholdskostnader.
3. Vurdering av energikostnader, på bakgrunn av konseptuelle oppsett for å sammenligne konseptene. Det er forutsett at energiprisene i stor grad samvarierer mellom diesel og elektrisitet. Hydrogenpris er forutsatt med estimerte påslag for virkningsgrader, produksjon og transport.
4. Resultatene fra usikkerhetsanalysene og energivurderingene er mattet inn i Jernbanedirektoratets samfunnsøkonomiske modellverktøy (SAGA). Karbonprising av dieselalternativet forutsettes også ivaretatt i denne modellen.

Den samfunnsøkonomiske lønnsomhetsanalysen viser konseptenes økonomiske måloppnåelse, representert gjennom blant annet investeringskostnader, driftskostnader, samt samfunnsøkonomiske gevinster og ringvirkninger – alt i et livssyklusperspektiv.

Det er viktig å være klar over at den samfunnsøkonomiske analysen også beregner økonomisk effekt avledet av forhold som også inngår i effektmålene, eksempelvis:

- Klimagassutslipp, gjennom beregnede kvotepriser for utslipp
- Energieffektivitet, gjennom effektiv ivaretagelse av energikilden fra opprinnelse til forbruk
- Attraktivitet, gjennom beregnet gevinst av bedret framføringstid

Samfunnsøkonomisk lønnsomhet/kostnad beregnes i netto nåverdier per jernbanestrekning, men også uttrykt som tiltakskostnad i kroner per tonn reduserte CO<sub>2</sub>-ekvivalenter.

#### 1.2.3 Ikke-prissatte virkninger

Estimerte effekter av andre ikke-prissatte virkninger er synliggjort som del av rapport om samfunnsøkonomiske virkninger.

#### **1.2.4 Følsomhet/risiko**

Som følge av at fremtiden er usikker, ikke minst for utvikling av umoden teknologi og fremtidige forventede energipriser, er det gjennomført følsomhetsanalyser. Disse vil kunne påvirke beslutningsvalget, da følsomhetsanalysene vil kunne avdekke robustheten i det forskjellige alternativene for at fremtiden kan endre seg.

#### **1.2.5 Helhetlige betraktninger**

Helhetlige betraktninger vil også kunne gjøre seg gjeldende i beslutningsvalget, da valg av konsept vil kunne påvirke, eller påvirkes av, andre investeringer og beslutninger, standardiseringsbehov, eksisterende kjøretøy og infrastruktur, aksept av risiko i investeringsporteføljen, kompleksitet i hele jernbanenettet og lignende.

### **1.3 Analysemodell**

Alternativanalysen tar for seg de konseptene og alternative varianter som er identifisert i mulighetsstudien. I tillegg er dagens løsning med som et referansealternativ. De forskjellige alternativene vil drøftes o hvert sitt delkapittel. Hver av disse er detaljert så langt det er ansett nødvendig for å kunne ta stilling til forventet effektmåloppnåelse og for å gjennomføre en samfunnsøkonomisk analyse. Underveis vil også de gjenværende alternativene kunne testes mot realisme, økonomi og muligheter for effektmåloppnåelse – for eventuelt å sile ut åpenbart urealistiske konsepter.

Som del av alternativanalysen er det også gjennomført følgende delanalyser:

- Energisimuleringer per bane og alternativ (se neste avsnitt)
- Usikkerhetsanalyse for investeringer, drift og vedlikeholdskostnader
- Energikostnader og virkningsgrader
- Analyse av ikke-prissatte virkninger
- Samfunnsøkonomiske analyser

### **1.4 Simuleringer**

I alternativanalysen har det blitt gjennomført simuleringer for å beregne og kvantifisere energiforbruk og utslipp for konseptene. Dette arbeid er dokumentert i delrapport Energisimulering KVV GREEN. Hensikten med simuleringene er følgende:

- Grunnlag for driftskostnader for hvert konsept
- Grunnlag for utslipp CO<sub>2</sub> fra drift for hvert konsept
- Utvikle et realistisk og robust forslag til del-elektrifisering
- Foreslå rimelige batteristørrelser for de konsept som bruker batterier
- Foreslå hydrogenbehov for hver simulert jernbanestrekning
- Analyse av forskjellige parametervariasjoner, f.eks. sammenligning av resultat fra forskjellige batterikjemier
- Grunnlag for estimering av kjøretidsgevinst

Simuleringsverktøyet D3S utviklet av WSP er benyttet som verktøy for simuleringene.

Arbeidsprosessen for simuleringer har vært følgende:

1. Få på plass infrastrukturdata og kjøretøydata for simuleringene, inkl. å forberede resultatene fra energimålinger som er blitt foretatt av CargoNet.
2. Validere modellen mot energimålinger, som gjøres gjennom å gjenskape de forutsetningene som var aktuelle ved energimålingen, og sammenlikne målt energiforbruk med simuleringresultatene.
3. Parallelt med valideringen ble det gjennomført en nøyaktighetsanalyse koblet til steglengde i simuleringsverktøyet. Dette var for å identifisere en steglengde som ga tilstrekkelig nøyaktighet i resultatene.

4. Når valideringen var gjennomført, konkluderte prosjektet med nøyaktigheten var tilstrekkelige, og neste steg var å definere de simuleringene som skulle gjennomføres til bruk for å svare ut punktene i ovenfor.
5. Usikkerheter knyttet til simuleringene er håndtert gjennom å gjøre et antall parametervariasjoner og analysere de resultatene.
6. For å kvalitetssikre simuleringsresultatene er det gjort uavhengige simuleringer av SINTEF med bruk av simuleringsverktøyet RaJA.

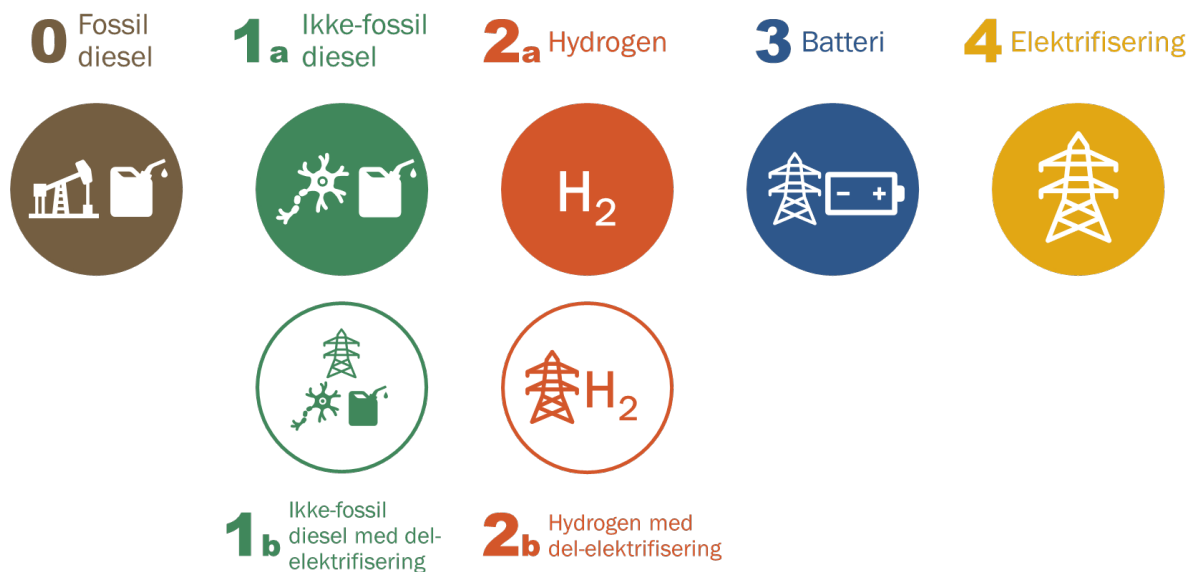
Resultatene fra simuleringene og inngående detaljer er presentert i delrapport Energisimulering KVVU GREEN, og et utvalg av disse er brukt i denne rapport.

## 2 Beskrivelse av konsepter, alternativer og togtilbudet

Konseptene som drøftes i alternativanalysen er:

- 0 – Fossil diesel (referansekonseptet)
- 1 – Ikke-fossil diesel
- 2 – Hydrogen
- 3 – Batteri
- 4 – Elektrifisering

Utbyggingskostnadene for tradisjonell fullelektrifisert jernbane er størst på strekninger som medfører utvidelse av tunneler eller der eksisterende bruer må byttes eller bygges om. Derfor er det laget varianter av enkelte konsepter, der strekninger med få slike kostnadsdrivende elementer finnes.



Hensikten er å avdekke om slike varianter gir bedre lønnsomhet enn de rendyrkede konseptene. Batteri er i seg selv en slik variant. Disse alternativene er dermed gjenstand for drøfting i alternativanalysen:

- 0 – Fossil diesel (referansealternativet)
- 1a – Ikke-fossil diesel
- 1b – Ikke-fossil diesel med del-elektrifisering
- 2a – Hydrogen
- 2b – Hydrogen med del-elektrifisering
- 3 – Batteri
- 4 – Elektrifisering

### 2.1 Togtilbudet i referansealternativ

Togtilbudet som legges til grunn som referansealternativ er Jernbanedirektoratets referansetogtilbud for NTP 2025-2036. I dette togtilbudet benyttes standardtogtyper for kjøretøy på de ulike linjene. Under de ulike linjene i underkapitlene under er det referert til hvilke standardtogtyper Jernbanedirektoratet har lagt til grunn som kjøretøytype. Beskrivelsene av standardtogtypene er vedlagt.



Figur 2: De ikke-elektrifiserte banestrekningene med togtilbud (transporttype).

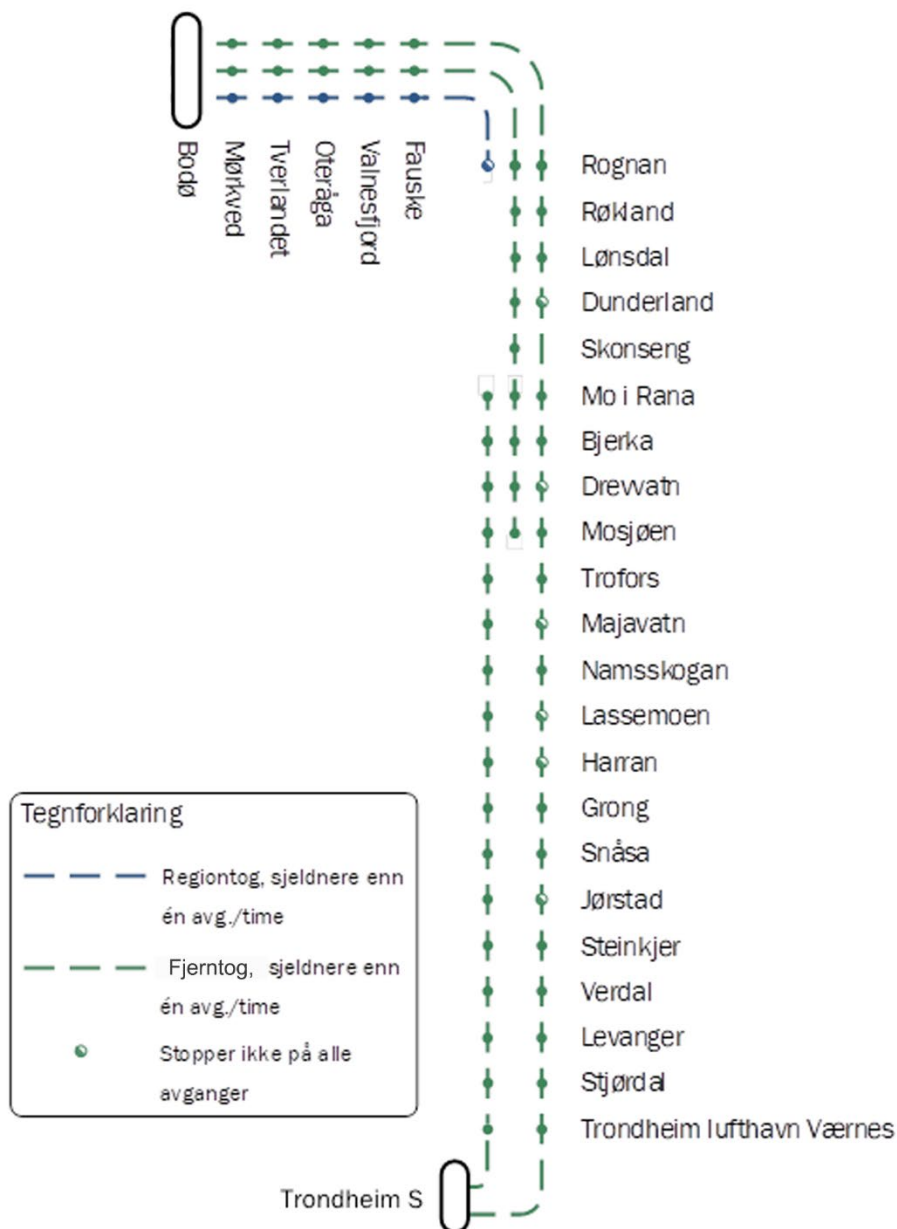
## 2.1.1 Nordlandsbanen

### 2.1.1.1 Persontog

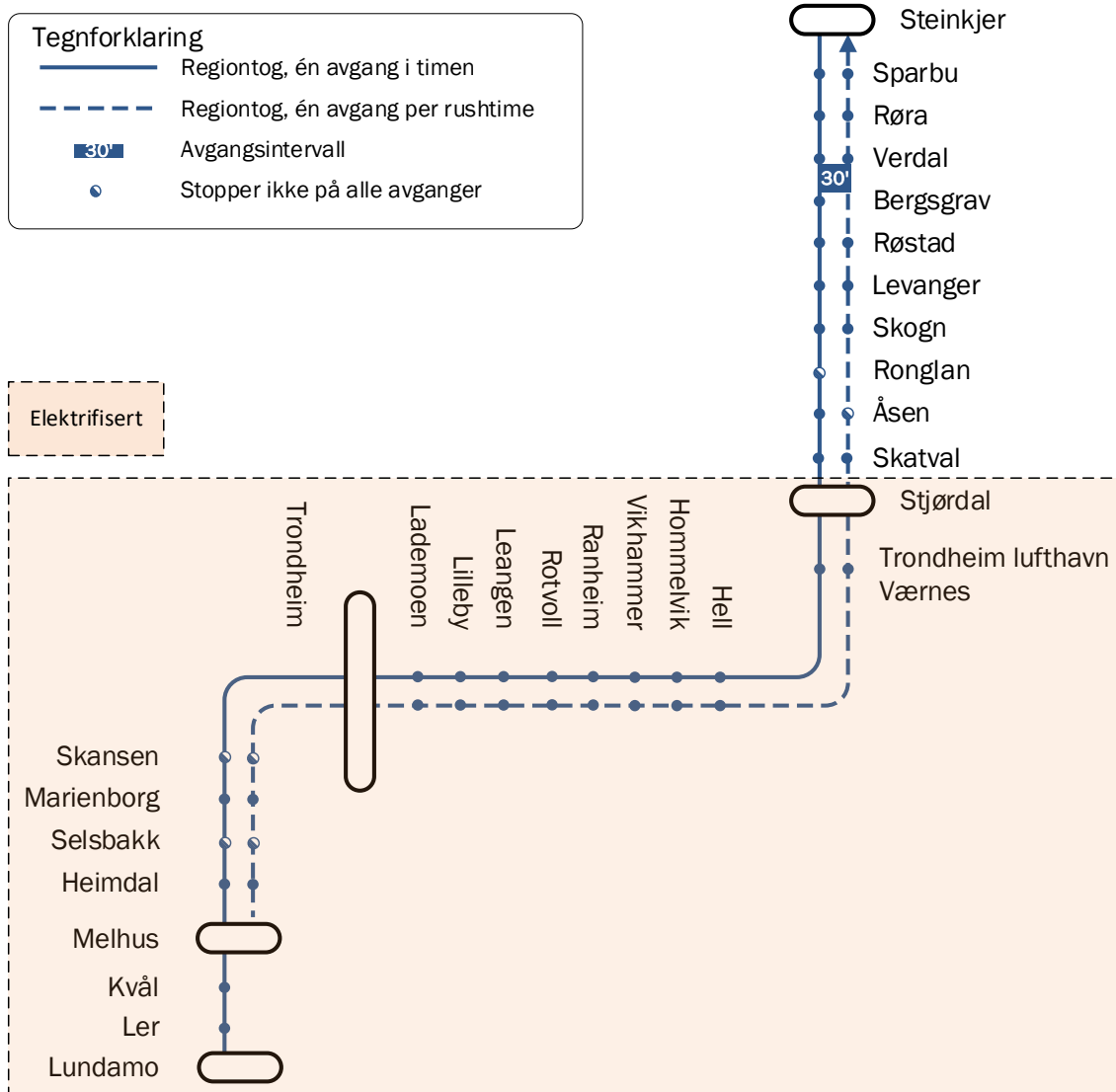
Linje F7 Bodø – Trondheim. 5 togpar i døgnet under dette linjenavnet, der kun to togpar går hele veien Bodø-Trondheim. Resterende togpar går på strekningene Mosjøen-Bodø (2 togpar) og Trondheim-Mo i Rana (1 togpar). Kjøretøytype FJ002 for fjerntogene som går til og fra Trondheim i denne linjen og RD002 for Bodø-Mosjøen.

Linje R75 Bodø – Rognan. 7 togpar i døgnet. Kjøretøytype RD002.

Linje R70 Steinkjer – Lundamo. 21 togpar i døgnet under dette linjenavnet, men kun 11 togpar går akkurat mellom de to endestasjonene. Øvrige togpar går på strekningen Steinkjer-Melhus. Kjøretøytype R004.



Figur 3: Persontogtilbudet på Nordlandsbanen i referansealternativet.



Figur 4: Persontogtilbudet som kalles Trønderbanen i referansealternativet. Togtilbudet går på Nordlandsbanen og Dovrebanen. Elektrifisert strekning er markert med skravert område. Bimodale kjøretøy vil derfor benytte elektrisk trekkraft mellom Lundamo og Stjørdal og diesel mellom Stjørdal og Steinkjer.



### 2.1.1.2 Godstog

GK25a Bodø-Brattøra (kombi)

4 togpar daglig

Framføringstid	Snitt toglangde	Etterhengt vekt	Standard kjøretøy
12,0 timer	476 meter*	1200 tonn	6-akslet Di <sup>1</sup>

\*En annen kilde sier 535 meter lange tog

GSM25 Ørtfjell-Mo i Rana (system malm)

6 togpar daglig

Framføringstid	Snitt toglangde	Etterhengt vekt	Standard kjøretøy
0,9	460 meter	3650 tonn <sup>2</sup>	6-akslet Di

GST18x Skogn-Sørli/Hove/Koppang (System tømmer, 350 m)

Ett eller færre daglige togpar (ca 3 per uke sammenlagt til alle destinasjonene i sør)

Framføringstid	Snitt toglangde	Etterhengt vekt	Standard kjøretøy
10,9; 9,3; 5 timer (hhv)	350 meter	1260 tonn (enkelte avg. lavere)	6-akslet Di (4- og 6-akslet EL) <sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> Noen avganger vil kjøres med 6-akslede bimodale diesel-kontaktledning lokomotiver. Forekomsten av den typen lokomotiver ble ikke vurdert ved utarbeidelse av referansealternativet til NTP; men har blitt tatt i bruk av flere togoperatører i 2022/2023. Analysene er basert på bruk av rene diesellokomotiver.

<sup>2</sup> Tallene fra referansealternativet er benyttet i analysene, de eksakte verdiene i tabellen for toglangde og etterhengt vekt er ikke konsistente med tekniske forhold for denne trafikken.

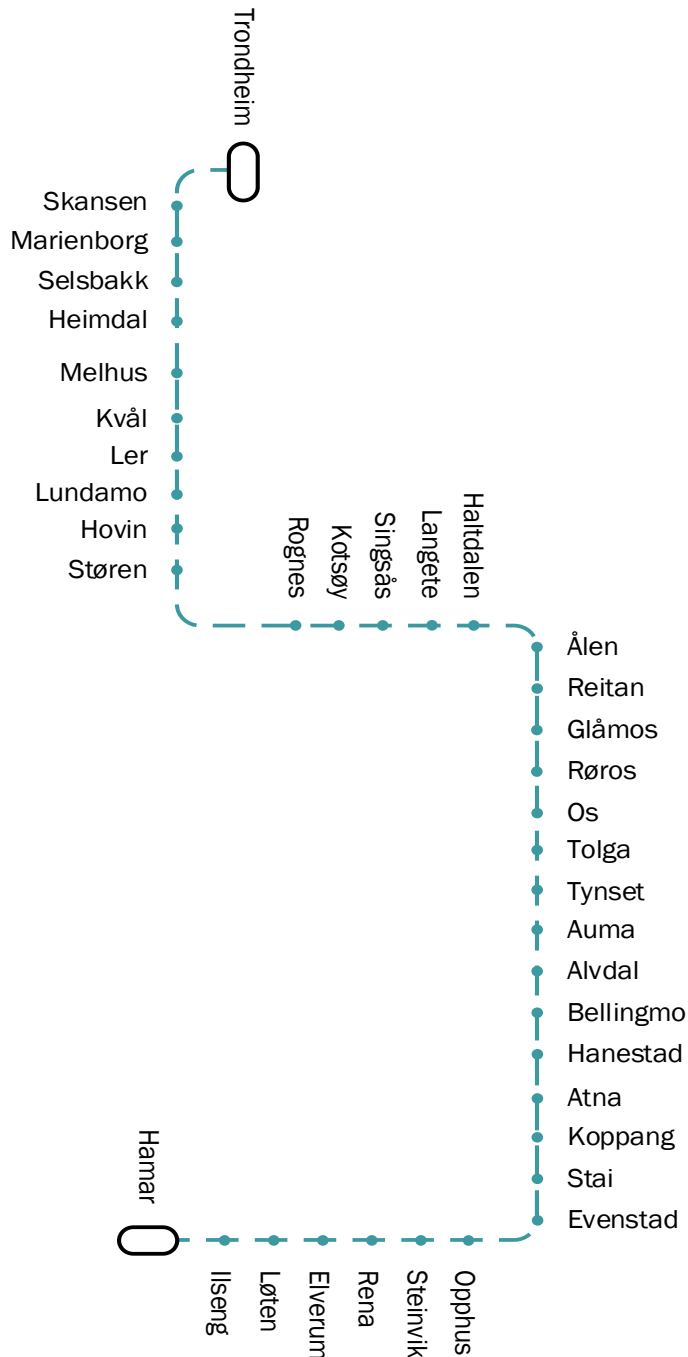
<sup>3</sup> Noen avganger vil kunne kjøres med 6-akslede bimodale diesel-kontaktledning lokomotiver. Forekomsten av den typen lokomotiver ble ikke vurdert ved utarbeidelse av referansealternativet til NTP; men har blitt tatt i bruk av flere togoperatører i 2022/2023. Analysene er basert på bruk av rene diesellokomotiver og eventuelt bytte til ellokomotiver når lengre deler av transporten skjer på elektrifisert strekning. .

## 2.1.2 Rørosbanen (med Solørbanen)

### 2.1.2.1 Persontog

RD60 Trondheim-Hamar (via Røros). 7 togpar i døgnet, hvor kun 2 går hele veien, 4 går Hamar-Røros og 1 går Røros-Trondheim. Kjøretøytype R004 for de som går hele veien fra Hamar til Trondheim og Røros-Trondheim, og R002 for de som kun går på Rørosbanen, altså Hamar-Røros.

Det kjøres ikke persontog på Solørbanen.



Figur 5: Persontogtilbudet på Rørosbanen i referansealternativet. Som beskrevet i teksten er ikke alle linjene gjennomgående Trondheim-Hamar, fra begge ender av relasjonen vender det tog på Røros. De togene som går videre fra Røros til Trondheim kjører også på Dovrebanen.

### 2.1.2.2 Godstog

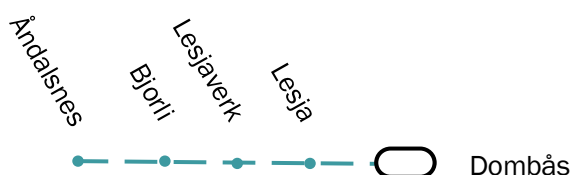
GST13x Koppang/Hovdmoen-Elverum/Braskereidfoss/Kongsvinger (system tømmer). Om lag 6 togpar daglig. GST13x-serien kjører også på Solørbanen.

Fremføringstid	Snitt tog lengde	Etterhengt vekt	Standard kjøretøy
0,7-4,9 timer	380-600 meter	2200 tonn (noen avg. lavere)	6-akslet Di, 2x4-akslet Di (4 og 2x4-akslet EL) <sup>3</sup>

### 2.1.3 Raumabanen

#### 2.1.3.1 Persontog

Linje RD65 Åndalsnes – Dombås, 4 togpar i døgnet. Kjøretøytype RD002.



Figur 6: Persontogtilbudet på Raumabanen.

#### 2.1.3.2 Godstog

GK23 Åndalsnes-Alnabru (kombi). 1 togpar i døgnet.

Fremføringstid	Snitt tog lengde	Etterhengt vekt	Standard kjøretøy
7,9 timer	460 meter*	1000 tonn	6-akslet Di (4-aks EL)

\*417 m tog lengde i en annen kilde i underlagsmaterialet

## 2.2 Sikkerhet på jernbanen

I NULLFIB1 ble det foretatt en grundig drøfting av hvordan sikkerhet innenfor jernbane blir ivaretatt. I det følgende er det gjenbrukt informasjon fra NULLFIB1.

### 2.2.1 Godkjenning av nye kjøretøy

Jernbanekjøretøy homologeres i henhold til et relativt omfattende europeisk regelverk som blant annet har til hensikt å ivareta sikkerheten på jernbanen. Kravene til kjøretøy for å ivareta sikkerhet er i utgangspunktet harmonisert gjennom europeisk lovgivning, med eventuelle ytterligere nasjonale krav der det er relevant. For å få godkjent nye jernbanekjøretøy så må man generelt:

- Verifisere at kjøretøyet fyller kravene i Technical Specifications for Interoperability (TSI) (verifiseres av Notified Body (NoBo), teknisk kontrollorgan)
- Verifisere at kjøretøyet fyller kravene i nasjonalt jernbaneregulativ verifiseres av Designated Body (DeBo), utpekt organ)
- Evaluere risikostyringsprosessen og resultatet (evalueres av Assessment Body (AsBo), assesserende enhet)
- Verifisere at prosessstandarden CENELEC EN 50126 er fulgt (verifiseres av Independent Safety Assessor (ISA), uavhengig assessor)

De primære kildene til relevante europeiske og norsk regelverk som vil gjelde for nye kjøretøy er:

- Interoperabilitetsdirektivet, 2008/57/EC (erstattes i Norge av 2016/797/EC i løpet av kort tid).
- Sikkerhetsdirektivet 2004/49/EC.
- CSM RA (Common Safety Method, 402/2013), felles sikkerhetsmetode for risikoevaluering og vurdering.
- CENELEC EN 50126 Railway applications –the specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS).
- Relevante Tekniske Spesifikasjoner for Samtrafikkevne (TSI) med tilhørende standarder.

Dette er et omfattende og velutviklet regelverk som har til hensikt å ivareta sikkerhet på jernbanen gjennom de krav som er stilt. Regelverket bygger på to ulike hovedprinsipper som utfyller hverandre i forhold til å klare å ivareta og utvikle sikkerhetsnivået i jernbanen uten å blokkere annen utvikling av jernbanesystemet. Prinsippene er «etterlevelseskraft» og «risikovurderingskraft».

Hoveddelen av regelverket er en samling av konkrete eller funksjonelle tekniske krav til kjøretøyenes funksjon og verifikasjon av disse, samt krav til prosesser og metoder i tilknytning til utvikling og bygging av kjøretøy. Dette er det vi her omtaler som «etterlevelseskraft», regler som det skal dokumenteres at er blitt fulgt. Velutviklede og dekkende «etterlevelseskraft» er godt egnet til å sikre ivaretagelse av sikkerhet, men det har svakheter i forhold til utvikling, der enkelte teknologier i perioder der det er nytt og ukjent, enten kan være u hensiktsmessig strengt regulert eller uregulert fordi det ikke finnes regler for den nye teknologien enda (og at slik regelverksutvikling ofte tar noe tid).

Den andre delen av regelverket som bygger på de ansvarlige parters vurdering av risiko i tilknytning til egen aktivitet, har sitt utspring i regelverket som omtales som CSM-RA. Her er det krav om vurdering og evaluering av risiko som er prinsippet som benyttes for å ivareta og utvikle sikkerhetsnivået i jernbanen. Ansvar for sikker drift er i jernbanens regler plassert relativt tydelig hos operatør. For at ikke dette regelverket ved innføring skal innebære voldsomme endringer i kravene til sikkerhet i de ulike delene av europeisk jernbane er det lagt til grunn at dagens nivå er akseptabelt. Kravet til vurdering av risiko er dermed knyttet til endringer. Kravet til at risikovurdering skal utføres er at det foreligger en endring i teknikk, operasjon eller organisasjon. Det er også gitt regler for hva som må dokumenteres for at aksept av risiko kan skje. Disse alternativene finnes:

- Dokumentere at endringen ikke er av betydning for sikkerhet,
- Dokumentere at det er dekkende og relevant «etterlevelseskraft» som er fulgt,
- Gjøres og dokumenteres en sammenlignende analyse mot et referansesystem som er vurdert til å representere et akseptabelt sikkerhetsnivå,
- Gjøres og dokumenteres en konkret sannsynlighetsvurdering av alle identifiserte potensielle farer.

Kravene til akseptabel sannsynlighet er imidlertid satt så høyt at denne metoden i praksis er svært krevende å benytte. Regelverket er godt egnet til å sikre ivaretagelse av sikkerhetsnivå i jernbanen. Det er få svakheter i dette regelverket med unntak av at det kun behandler det som faktisk gjøres, ved utrulling av ny teknologi vil denne delen av regelverket ikke gi svar på om aktiviteter som ikke er gjort enda vil kunne bli vurdert som akseptable eller ei. En annen svakhet er at det vil kunne forekomme at ulike operatører kommer frem til ulike konklusjoner i forhold til hva de vurderer å være akseptabelt.

Siden de ansvarlige operatørene er gitt ansvaret for å vurdere risiko i tilknytning til egen operasjon er myndighetene (for Norge Statens Jernbanetilsyn) gitt rettigheten til å tildele og trekke tilbake det sikkerhets sertifikat eller den sikkerhetsgodkjenning operatører må ha for å kunne operere på det nasjonale jernbanenettet. På denne måten er systemet rigget slik at det er innebærer svært stor risiko for operatørene å gjøre svake eller dårlige vurderinger av sikkerhet. De endringene som er vurdert til å være vesentlige er i tillegg underlagt krav til metodekontroll av en ekstern part (AsBo).

Prosedyren for vurdering av 'Sikkerhetskritisk hendelse' skal gjennomføres av togselskap og enhet ansvar for vedlikehold (ECM) som står ansvarlig for operasjon og vedlikehold. Sammenlignet med luftfart, hvor flyprodusentene er ansvarlig for kritikaliteten til komponentene og systemfunksjonaliteten, har derimot ikke produsentene av jernbanekjøretøy dette ansvaret gjennom levetiden, men kun begrenset til at endelig godkjenning er gitt av tilsynsmyndigheter. Nivået for å vurdere om en funksjon feiler skal ikke være forutbestemt/fastlagt, men enhver togoperatør og ECM skal ha ansvaret for dybden og omfanget av en analyse.

Endring av energibærere til f.eks. hydrogen (og/eller batterier) innebærer ikke bare risikoforhold knyttet til selve kjøretøyet, men også grensesnitt til forhold innen infrastrukturen (f.eks. lade-/tankepunkter, lading på strekninger, brann- og eksplosjonssikkerhet i tunneler, mangel på energi ved f. eks fastkjøring i snø mm). Jernbanekjøretøy (passasjertog) som både benytter ordinær kjørestrøm og hydrogen (og batterier) har gjennomgått en homologisering og er godkjent av tilsynsmyndigheter i andre europeiske land. Dette betyr nødvendigvis ikke at et slikt kjøretøy passer for de betingelsene som gjelder for jernbanen i Norge.

# 3 Alternativ 0 – Fossil diesel

## 0 Fossil diesel

Dette er referansealternativet/null-alternativet.

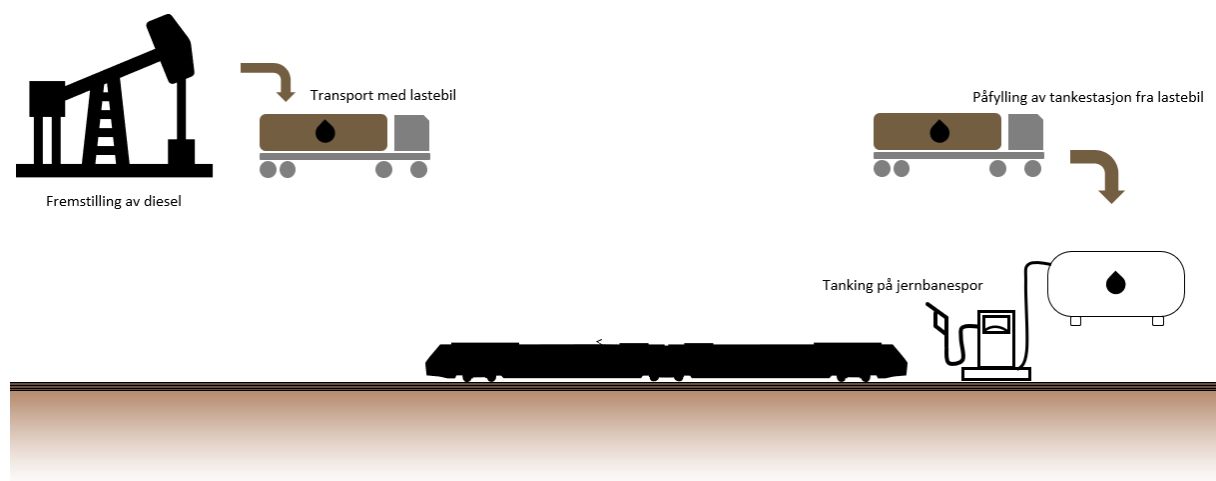
Fossil diesel er energikilden for kjøretøy på ikke-elektrifiserte strekninger og andre jernbanekjøretøy som ikke kan benytte elektrisk drivkraft. Sistnevnte gjelder blant annet skiftelokomotiv på noen godsterminaler og arbeidsmaskiner.

Forbrenningsmotorer som benytter fossil diesel som energikilde, produserer utslipp av luftforurensing og partikler i det ytre miljø. Luftforurensingen fra dieseldrift består blant annet av nitrogenoksider, partikler, sot og hydrokarboner. Dette anses som uheldig i et nullutslippssamfunn, både for klima, miljø og menneskene som oppholder seg i nærhet til kjøretøy og maskiner med forbrenningsmotorer.



### 3.1 Beskrivelse av energibærer

Dieseldrift har blitt benyttet på jernbanen i om lag 100 år og er forutsigbart, da diesel er lett tilgjengelig og rekkevidden til dieseldrevne kjøretøy er stor. Dieselskjøretøy har lavere effekt enn elektriske kjøretøy, og dermed lavere trekkraft basert på lokomotivets effekt, topphastighet og akselerasjonsevne. Dieseldrevne kjøretøy har også et høyere energiforbruk og vedlikeholdsbehov enn elektriske kjøretøy.



#### 3.1.1 Innblanding av biodrivstoff i fossil diesel

Fra 1. januar 2023 er det krav om at flytende drivstoff til ikke-veigående maskiner (inkl. jernbanekjøretøy) skal inneholde minst 10 % avansert biodrivstoff. Dette refereres til som omsetningskravet, som forvaltes av Miljødirektoratet. Det er den som omsetter drivstoffet som står til ansvar for å oppfylle kravene [2].

Avansert biodrivstoff skiller seg fra konvensjonelt biodrivstoff ved at det produseres av rester og avfall fra næringsmiddelindustrien, landbruk eller skogbruk, og dermed ikke har sitt opphav i råstoff som ellers kan brukes til mat eller fôr.

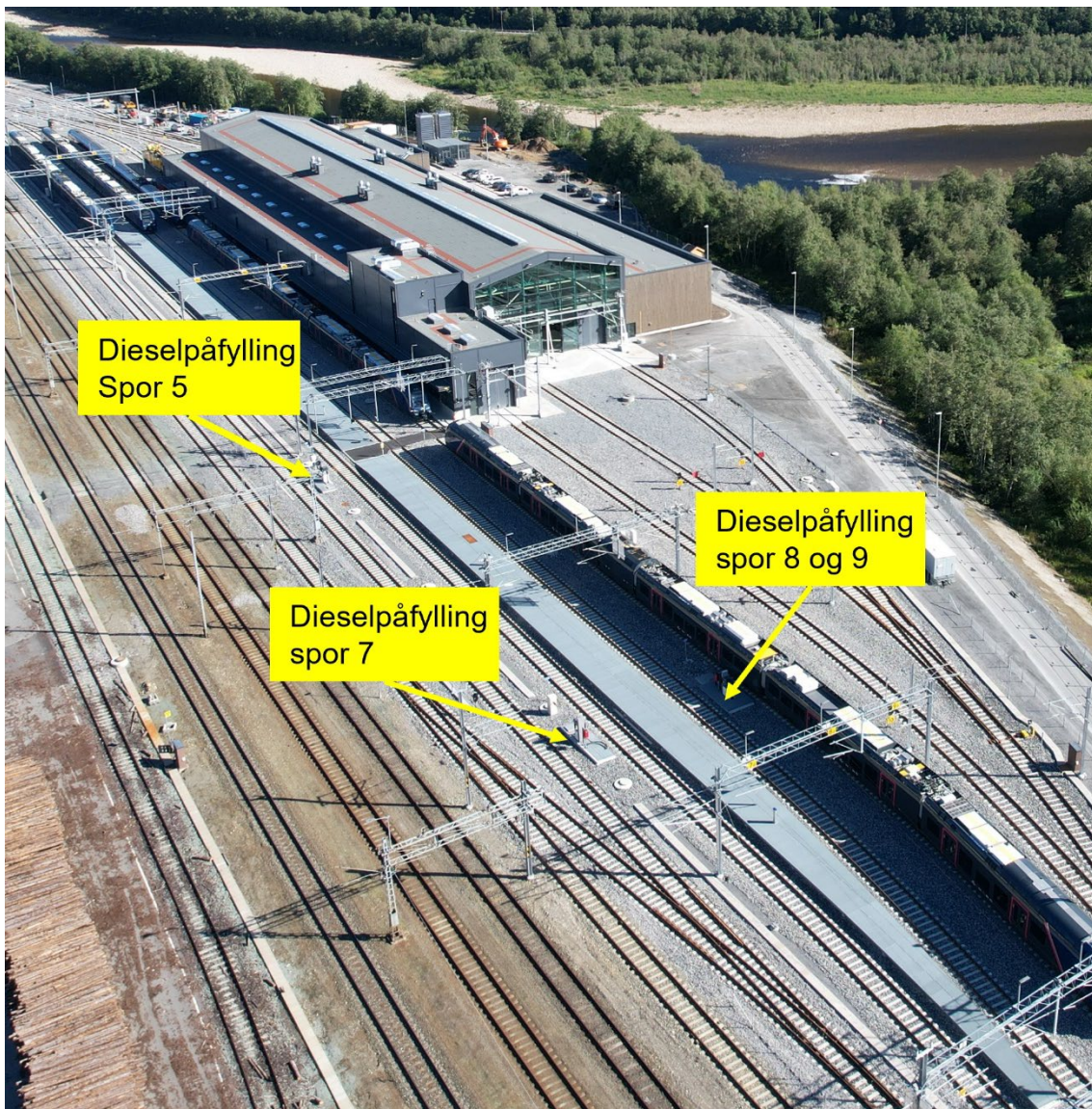
Avansert biodrivstoff kalles også HVO, se tabell i kapittel 4.6 (hydrogenbehandlet vegetabilsk olje), eller 2. generasjons biodiesel. Det har mye lavere lokale utslipp enn fossil diesel, og gir derfor betydelig bedre luftkvalitet ved eksempelvis arbeid i tunnel.

## 3.2 Infrastruktur

Ifølge Network Statement 2023 (Bane NOR) finnes følgende påfyllingsanlegg for drivstoff til tog [3]:

- Alnabru
- Røros
- Åndalsnes
- Hamar
- Støren
- Marienborg
- Steinkjer
- Mo i Rana
- Bodø

Selskapet Togdiesel AS eid av Bane NOR er hovedleverandøren av diesel til jernbanetransport. De driver anleggene som er nevnt over. I tillegg er det mulig å få levert diesel andre steder ved hjelp av tankbil



Figur 7: Støren diesel påfyllingsanlegg, oversiktsbilde (foto fra Network statement).



Figur 8: Fyllestasjon for diesel. Bildet til venstre er fra Røros hensettingsanlegg (svingskiven i bakgrunnen), mens bildet til høyre viser dispenser ved Støren påfyllingsanlegg (begge foto fra Network statement)

Påfyllingsanleggene for diesel ligger på endestasjoner eller større stasjoner langs de ikke-elektrifiserte strekningene. De er tilgjengelige med egne spor inne på stasjonsområdet.

### 3.3 Kjøretøyflåten

Det er forutsatt samme type kjøretøyflåte i alle konsepter, men med ulike energibærere:

- Regiontog, ca. 110 m lange motorvognsett. Omfatter også regiontog i distrikt, som sannsynligvis vil være kortere enn regiontog til bruk i byområdene.
- Fjerntog, 220 meter lange motorvognsett.
- Godsløkomotiv, 6-akslet.

Det er forutsatt overgang til bimodale kjøretøy (diesel-kontaktledning) i referansealternativet. I dagens situasjon benyttes det både rene dieselskjøretøy og bimodale kjøretøy på de ikke-elektrifiserte strekningene. Ettersom mange av linjene går på både elektrifiserte og ikke-elektrifiserte baner, anskaffer eiere/brukere av kjøretøy i økende grad bimodale kjøretøy. F.eks. har Norske tog anskaffet bimodale regiontog av typen FLIRT (type 76) til regiontrafikken i Trøndelag, og enkelte av kombigodsoperatørene har anskaffet bimodale lokomotiver (Eurodual).

Bimodale og hybride kjøretøy er i utgangspunktet synonyme begreper, men i jernbanesammenheng forbindes oftest bimodale kjøretøy som kjøretøy som har en kombinasjon av diesel og kontaktledning som energibærer. Ved bruk av andre kombinasjoner enn diesel-kontaktledning benytter vi i denne utredningen derfor begrepet hybride kjøretøy.

Det er en forskjell på ordinære regiontog og regiontog i distrikt. I alternativanalysen er det likevel gjort en forenkling, da referansealternativet i praksis angir samme kjøretøytype i kostnadsbildet for begge togtilbudene. I energisimuleringene er det imidlertid skilt mellom regiontog og regiontog i distrikt. At dette er behandlet litt ulikt i simuleringer og alternativanalyse er ikke vurdert å ha vesentlig innvirkning på resultatene.



Tabell 1 Type og antall kjøretøy som forutsettes i Alternativ 0 Fossil diesel

Kjøretøytype	Nordlandsbanen	Raumabanen	Røros- og Solørbanen	Samlet
Regiontog diesel-el	18	3	8	29
Fjerntog diesel-el	4	0	0	4
Godstog diesel-el	12	2	14	28

#### Dieselskjøretøy og bimodale (diesel-kontaktledning) kjøretøy i dag

Persontogtyper som har diesel som energikilde:

- Di 4 lokomotiv, er bygget av tyske Henschel
- Type 92 DMU, er bygget av tyske Duewag
- Type 93 DMU, er bygget av Bombardier Transportation
- Type 76 DMU (bimodalt diesel-kontaktledning), er bygget av Stadler Rail

Skiftelokomotiv og godslokomotiv som har diesel som energikilde:

- Skd 224 er bygget av tyske Gmeinder
- Skd 226 er bygget av Kalmar Verkstad
- Skd 229 er bygget av Henschel
- V4 er bygget av Henschel
- DE6400 er bygget av Maschinenbau Kiel
- Br 261 er bygget av Voith Turbo Lokomotivetechnik GmbH
- Di.8 (primært brukt i dag til ad hoc-oppdrag, ikke i ordinær drift)
- TME er omlitret fra ME og bygget av tyske Henschel
- TMY er ombygd MY (Nohab)
- TMZ er bygget av Nydqvist & Holm (Nohab) i Trollhättan på lisens fra GM
- T44 er bygget av Nohab og Kalmar Verkstad
- CD312 er bygget av Vossloh, også benevnt Euro 4000
- Br941 er bygget av Vossloh, også benevnt G 2000G BB)
- Br159 (bimodalt diesel-kontaktledning) er bygget av Stadler Rail, også benevnt Eurodual

De fleste dieseldrevne gods- og persontog har dieselelektrisk drift. Motoren driver da en generator som skaper elektrisk energi som driver hjulene ved hjelp av elektriske motorer plassert i akslene. Et diesellokomotiv kan også ha en hydraulisk kraftoverføring, der dreiemomentet overføres ved hjelp av en hydraulisk momentomformer, men disse brukes primært i skiftelokomotiv og arbeidsmaskiner, og for energiberegninger benyttes derfor dieselelektriske drevne lokomotiv og motorvognsett.

### 3.4 Tekniske løsninger som er lagt til grunn i referansealternativet

Det er ikke behov for investeringer i infrastruktur i referansealternativet. Eventuelle avvik av HMS-messig art og lignende forutsettes lukket innen investeringstidspunktet for alternative energibærere.

### 3.5 Teknologisk modenhet og forventet utviklingsløp

Fossil diesel har vært i bruk på jernbanen siden 1920-tallet og er forventet faset ut i forbindelse med overgang til et nullutslippssamfunn. Gjennom markedsundersøkelsen er det avdekket at dieseldrevne kjøretøy ikke vil være del av kjøretøyproducentenes fremtidige kjøretøyflåte.

### 3.6 Konsekvenser for togtrafikken

Dieseldrevne kjøretøy kan gi negative opplevelser for passasjerene og de ansatte på toget som følge av at dieselmotoren gir mer støy og ubehagelig lukt enn elektrisk drift.

Dieseldrevne arbeidsmaskiner gir dårlig luftkvalitet, spesielt ved arbeid i tunnel. Spordrift merker økende krav til forbedring av luftkvalitet som en del av arbeidsmiljøet, og dette kan føre til at det kan forbys å benytte forbrenningsmotorer i tunnel. Andre generasjons biodiesel har betydelig lavere lokale utslipp enn fossil diesel, og de som vedlikeholder og bygger jernbane ser klare fordeler ved å ta i bruk dette, spesielt med hensyn til arbeidsmiljø. Imidlertid gjør prisen at de ikke gjør dette annet enn ved nødvendighet, f.eks. langvarig arbeid i tunnel der andre løsninger ikke har gitt tilstrekkelig utlufting. Den primære årsaken til at biodiesel ikke brukes mer, er at den økte kostnaden gjør entreprenøren i dårlig stand til å konkurrere med andre entreprenører på pris.

Når det arbeides i tunnel, stilles det krav til utluftning når luftkvaliteten har blitt for dårlig. Drivstoff med lavere lokale utslipp vil derfor også effektivisere arbeid i tunnel, da mindre tid vil måtte gå med til utluftning.

### 3.7 Kostnader

Referansealternativet (nullalternativet) innebærer ingen investeringer i infrastruktur. Eventuelle avvik i dagens situasjon forutsettes lukket innen investeringstidspunktet.

Vedlikeholdskostnadene for nullalternativet settes som basis og defineres derfor til null. Øvrige alternativer vil dermed referere sine vedlikeholdskostnader i forhold til dette nullalternativet.

Kjøretøyene vil ha ulike anskaffelseskostnader, avhengig av hvilken energibærer som benyttes. Bimodale dieselskjøretøy er et ferdig produkt og har dermed en høyere sikkerhet for anskaffelseskostnad (og lavere pris) enn de øvrige konseptene, med unntak av konseptet elektrifisering som benytter rendyrkede elektriske kjøretøyer.

Kjøretøykostnadene beregnes med en årlig avskrivningskostnad, basert på anskaffelseskostnad og levetid, i modellen for samfunnsøkonomiske analyser. Denne modellen er standardisert for alle utredninger i Jernbanedirektoratets regi. Nullalternativet vil derfor beregnes med årlige avskrivningskostnader for de kjøretøyene som inngår i referansealternativet.

Tabell 2 Kostnader til kjøretøyanskaffelse som forutsettes i Alternativ 0 Fossil diesel i millioner kroner.

Kjøretøytype	Mill kr. per kjøretøy	Nordlandsbanen	Raumabanen	Røros- og Solørbanen
Regiontog	212,5	3 825	638	1 700
Fjerntog	507,5	2 030	0	0
Godstog	70,7	848	141	989
<b>Sum per bane</b>		<b>6 703</b>	<b>779</b>	<b>2 690</b>

Tabell 3 Batterikostnader for kjøretøy (sum per togkategori per bane) i millioner kr/år konsept 0 Fossil diesel

Kjøretøytype	Nordlandsbanen	Raumabanen	Røros- og Solørbanen
Regiontog	1,1	0,2	0,5
Fjerntog	0,4	0,0	0,0
Godstog	1,4	0,2	1,7
<b>Sum</b>	<b>2,9</b>	<b>0,4</b>	<b>2,1</b>

## **Energikostnader**

Fra 1. januar 2023 ble det innført omsetningspåbud for biodrivstoff i anleggsgdiesel og fyringsolje. Stortinget har vedtatt at omsetningspåbudet skal være på 10% avansert biodrivstoff. Dette er biodrivstoff fremstilt av rester og avfall. Omsetningspåbudet innebærer at det vil blandes inn 10% biodrivstoff i anleggsgdiesel og fyringsolje i snitt over året. Hvor mye biodrivstoff som vil bli blandet inn til enhver tid vil variere med sesong og sted i landet.

Drivstoffleverandør (Circle K) blander inn HVO (Hydrogenert Vegetabilsk Olje) i anleggsgdiesel og fyringsolje for å løse omsetningspåbudet. HVO har tilnærmet identiske egenskaper som fossil diesel, og innblandingen vil derfor ikke påvirke kvaliteten på de produktene som blir levert.

I forbindelse med Stortingets behandling av statsbudsjett for 2023 er det besluttet at grunnavgiften fjernes. Den har togselskapene allerede hatt fritak for med hensyn til skinnegående kjøretøy.

Det vil imidlertid fortsatt være CO<sub>2</sub>-avgift på både anleggsgdiesel og fyringsolje, men det svares ikke CO<sub>2</sub>-avgift av biodrivstoff. Ettersom bioandelen gjennom året i snitt vil være på 10%, vil CO<sub>2</sub>-avgiften på anleggsgdiesel og fyringsolje måtte dekke opp for en fossilandel på 90%.

CO<sub>2</sub>-avgiften på disse produktene er fra 1. januar 2023 derfor justert til å utgjøre 90% av full avgift. Full avgift i 2023 var forslått å skulle være 2,53 kr/l. Dermed er 90% av full avgift i dag 2,28 kr/l.

Når det gjelder kostnaden for biodrivstoff for å dekke omsetningspåbudet på 10%, vil prisen på anleggsgdiesel og fyringsolje ilegges et biotillegg på 0,12 USD/liter fra 2023. Biotillegget omregnet i norske kroner vil justeres månedlig basert på utvikling i dollarkursen.

## **3.8 Oppnåelse av effektmål**

### **3.8.1 Reduserte klimagassutslipp innen 2030**

Det forutsettes utslipp i 2030 som vedtatt i henhold til innblandingskrav for biodiesel i 2023.

Utslipet er beregnet til 70 000 tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter per år, basert på togtilbudet i referansealternativet og definert kjøremønster i utredningens energisimuleringer.

### **3.8.2 Reduserte klimagassutslipp innen 2050**

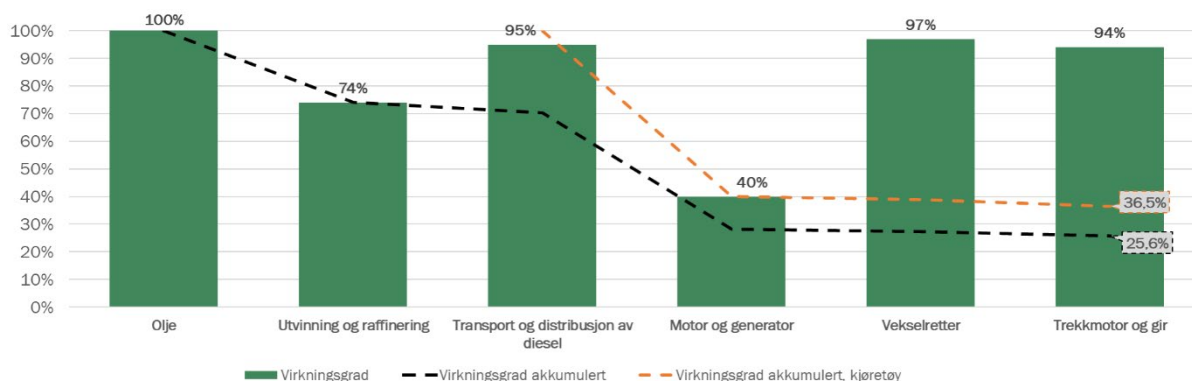
Nullalternativet forutsetter ingen endring, og gir dermed likt utslipp i 2050 som i 2023 og i 2030. Utslipet er beregnet til 70 000 tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter per år, basert på togtilbudet i referansealternativet og definert kjøremønster i utredningens energisimuleringer.

### **3.8.3 Energieffektivitet**

Energieffektiviteten for diesel «tank-to-wheel» er beregnet til 36,5 % (se vedlagt energiberegningsrapport). Dette er lavt sammenlignet med elektriske togsett. Lav energieffektivitet skyldes primært konverteringen fra lagret kjemisk energi i diesel til mekanisk energi som driver togets aksler, som utvikler mye spillvarme.

Energieffektiviteten til diesel fra «well-to-wheel» vil variere stort i forhold til hvordan råoljen utvinnes.

Ifølge en rapport fra Oljedirektoratet [4] er det anslått at det går med omtrent 3,5 kWh energi for å produsere en liter diesel fra råolje. Dette tallet inkluderer utvinning fra oljebrønn på norsk sokkel i Nordsjøen og raffinering. Energidensiteten til diesel er 10,08 kWh per liter. Det gir dermed en virkningsgrad på 74% fra oljeutvinning til ferdig raffinert diesel.



Figur 9: Virkningsgrad fossil diesel (hele kjeden fra "well-to-wheel"). Figuren illustrerer hvordan virkningsgraden for hvert trinn i kjeden (fra venstre til høyre) på virker virkningsgrad ved effektuttak.

### 3.8.4 Togtilbudets attraktivitet

Referansealternativet forutsetter bimodale kjøretøy som bruker diesel på de ikke-elektrifiserte strekningene. De tekniske egenskapene som følger av det, blir sammenlignet med øvrige konsepter.

### 3.8.5 Oppsummering av alternativets effektmåloppnåelse

Følgende tabell oppsummerer effektmåloppnåelsen i konsept 0.

Tabell 4 Effektmåloppnåelse for nullalternativet (referansealternativet).

Effektmål	Vurderingsmetode	Måleenhet	Verdi (avrundet)	Relativ skår
1. Utslipp innen 2030	Beregnet CO <sub>2</sub> -utslipp	Tonn CO <sub>2</sub> e årlig gjennomsnitt 2023-2029	70 000	0
2. Utslipp innen 2050	Beregnet CO <sub>2</sub> -utslipp	Tonn CO <sub>2</sub> e årlig gjennomsnitt 2030-2049	70 000	0
3. Energieffektivitet	Energieffektivitet WTW	Prosentvurdering	26 %	0
	Forbruk av knappe ressurser	Kvalitativ vurdering	0,2 % av Norges marked for fossilt drivstoff	0
4. Attraktivitet	Akselerasjonsevne	Kvalitativ vurdering	Referanse	0
	Trekraft	Kvalitativ vurdering	Referanse	0
	Lade-og-tankestopp	Kvalitativ vurdering	Referanse	0
	Effektiv tog lengde	Kvalitativ vurdering	Referanse	0

### 3.9 Tilfredsstillelse av rammebetingelser

Dersom enkelte av løsningsalternativene ikke tilfredsstiller rammebetingelsene innenfor en tidsperiode, må det tas stilling til om alternativet skal forkastes, eller om det eventuelt kan fungere i en kombinasjonsløsning eller for deler av jernbanesektoren.

Alternativet vurderes å ikke kunne tilfredsstille flere av rammebetingelsene på lang sikt.

#### 1. Løsningen må ikke bidra til å øke de globale klimagassutslippene.

Alternativet er referanse for denne rammebetingelsen.

#### 2. Realiserbarhet i drift

Løsningen må ha et driftskonsept som muliggjør effektiv drift under forventede fremtidige myndighetskrav. Det er økende grad av bekymring om dagens løsning vil kunne opprettholdes ettersom krav til ytre miljø, klima og arbeidsmiljø forventes å bli strengere i årene som kommer, og kjøretøyleverandørene vil etter hvert fase ut kompetanse og materiell som støtter dieseldrevne maskiner på lengre sikt.

#### 3. Driftsstabilitet og regularitet

På kort sikt vil driftsstabilitet og regularitet kunne opprettholdes på dagens nivå, men på lengre sikt vil en aldrende kjøretøypark resultere i større avvik enn i dag. På lang sikt vil det også kunne bli utfordrende å reanskaffe kjøretøy og reservedeler.

#### 4. Teknologimodenhet

Dieselløsninger er moden teknologi, men må utvikles videre for å tilfredsstille stadig strengere krav til utslipp og arbeidsmiljø.

#### 5. Interoperabilitet

I dag brukes både dieselskjøretøy og bimodale kjøretøy på de ikke-elektrifiserte banene. Ved bruk av rene diesellokomotiver i dag må godsoperatørene bytte lokomotiv for en del linjer, bl.a. bytter tømmerogene til Sverige lokomotiv i Kongsberg og kombitogene til Åndalsnes bytter lokomotiv på Dombås. Referansealternativet forutsetter overgang til bimodale kjøretøy (kontaktledning – diesel), som vil ivareta en høyere grad av interoperabilitet enn i dagens situasjon.

#### 6. Standardisering

Standardisering er plass i dag, men det forventes stadig strengere standarder knyttet til utslipp.

#### 7. Samfunnssikkerhet

Sårbarheten i forhold til opprettholdelse av jernbanens samfunnsfunksjon må ikke få unødige eller uakseptable økninger. Vesentlig økt risiko for storulykke knyttet til jernbanen må ikke innføres. Alternativet er referanse for denne rammebetingelsen.

#### 8. Tilfredsstille lover, forskrifter og annet førende regelverk

Arbeidsmiljøet i tunneler, på verksteder og på stasjoner under bakken er utfordrende knyttet til eksos fra dieselmotorene. Dersom man fortsetter med dagens drift vil arbeidsmiljøforholdene sannsynligvis ikke kunne bedres i samme grad som ved et teknologiskifte, og det må gjøres tiltak for å tilfredsstille stadig strengere regelverk på området. I tillegg til de globale klimagassutslippene vil fortsatt fossil dieseldrift også medføre at lokale miljøpåvirkninger som støy, avgasser og partikkelutslipp fortsetter på de ikke-elektrifiserte strekningene. Også på dette området vil stadig strengere regelverk kunne medføre behov for tiltak for fortsatt dieseldrift.

#### 9. Kompatibilitet med dagens teknologi

Kompatibilitet er vel etablert i dag.

## 4 Alternativ 1a – Ikke-fossil diesel

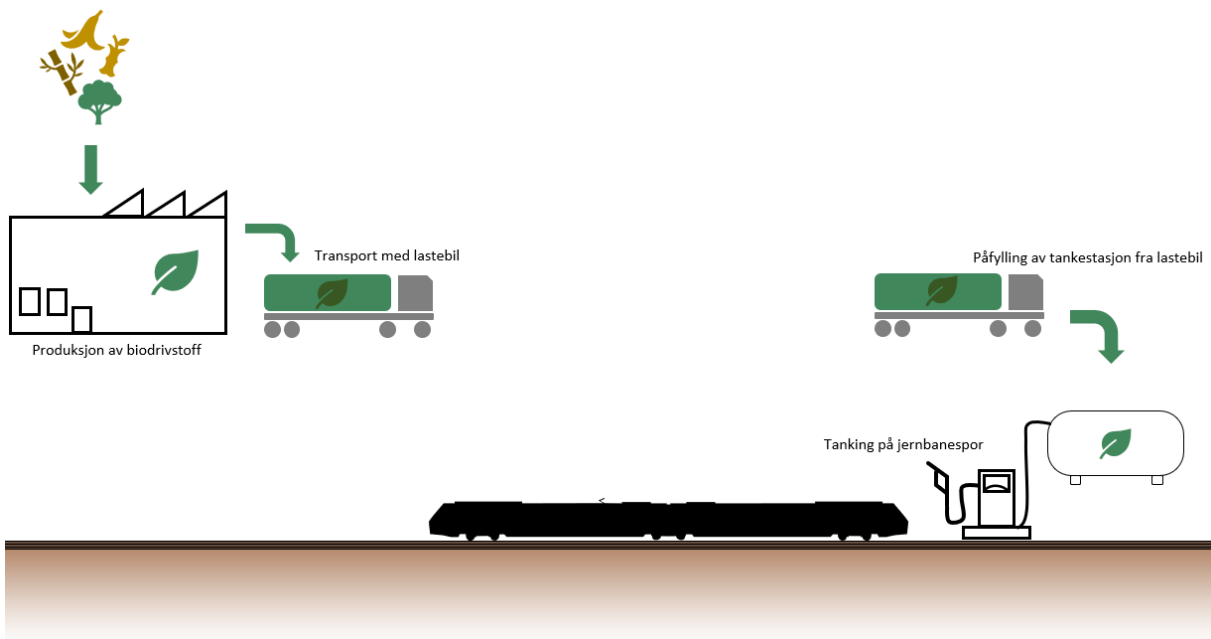
### 4.1 Beskrivelse av energibærere

Alternativ 1a har mange fellestrekk med referansealternativet, og innebærer skifte av drivstoff til ikke-fossil type på eksisterende jernbanekjøretøy. Eventuelle tilpasninger for endret drivstoff kan være avhengig av drivstofftype.

Biodrivstoff er flytende eller gassformig brensel som er fremstilt av biologisk materiale, ofte kalt biomasse. I norsk regelverk brukes begrepene konvensjonelt og avansert biodrivstoff basert på hvilket råstoff biodrivstoffet er fremstilt av, samt produksjonsmetode. Konvensjonelle biodrivstoff fremstilles av råstoff som også kan brukes til å produsere mat eller dyrefôr (landbruksvekster). Dette kalles av noen også 1. generasjons biodrivstoff. Avanserte biodrivstoff framstilles i hovedsak av rester og avfall fra næringsmiddelindustri, landbruk eller skogbruk og kommer ikke fra råstoff som kan utnyttes som mat eller dyrefôr. Dette kalles av andre også 2. generasjons biodrivstoff.

For alternativ 1a antas avansert biodrivstoff som for eksempel HVO-100. Det er kompatibelt med kjøretøy som er bygget for fossil diesel, gir en høy reduksjon i CO<sub>2</sub>-utslipp og tåler kulde bedre enn mange andre biodieseltyper [5]. For en oversikt over ulike avanserte biodrivstofftyper som er vurdert, se tabell i avsnitt 4.5.

## 1a Ikke-fossil diesel



Figur 10 Illustrasjon av alternativ 1a

Norge har et omsetningskrav [2] for biodrivstoff til veitransport. Andelen biodrivstoff som kreves for å oppfylle omsetningskravet for veitrafikk er på mellom 14,75 og 17 %. Fra 1. januar 2023 er det også et omsetningskrav for avansert biodrivstoff til ikke-veigående maskiner (inkludert jernbane). Dette kravet er i lovteksten omtalt som «andre formål enn veitrafikk, luftfart og sjøgående fartøy». Siden det kun er avansert biodrivstoff som kan brukes til å oppfylle kravet, telles det ikke dobbelt her. Omsetter av flytende drivstoff og flytende brensler skal ved omsetning til andre formål enn veitrafikk, luftfart og fartøy sørge for at minst

10 volumprosent av totalt omsatt mengde flytende drivstoff og flytende brensler til disse formålene per år består av avansert biodrivstoff og avansert flytende biobrensel. Biogass skal holdes utenfor kravet.

I 2021 var slakteavfall som ikke kan brukes til dyrefôr det mest brukte råstoffet i avansert biodrivstoff, etterfulgt av brukt frityrolje og dernest raps. Nesten alt flytende biodrivstoff som brukes i Norge er importert fra andre land. Tall fra 2021 viser at 58 % kommer fra USA, 9 % fra Tyskland, 9 % fra Kina og 3 % fra Ukraina. Det ble også rapportert inn 6,9 millioner liter biodrivstoff basert på norsk råstoff i 2021, noe som tilsvarer 1 % av alt biodrivstoff. Mesteparten av dette er biprodukt fra skogindustrien.

Klima- og miljødepartementet ønsker at norske forbrukere får mer informasjon om innholdet i biodrivstoffet de kjøper. Miljødirektoratet har derfor fått i oppdrag å publisere informasjon om råstoff for biodrivstoffet hver omsetter i veitrafikk selger.

Listen under viser de tre mest brukte råstoffene per omsetter i 2021, i synkende rekkefølge. Det var ingen av omsetterne som brukte palmeolje eller soya i 2021.

- Circle K: Slakteavfall uegnet til dyrefor, brukt frityrolje, raps
- Esso: Slakteavfall uegnet til dyrefor, brukt frityrolje, raps
- St1: Slakteavfall uegnet til dyrefor, brukt frityrolje, hvete
- Uno-X/YX: Raps, slakteavfall uegnet til dyrefor, brukt frityrolje
- Preem: Tallolje, slakteavfall uegnet til dyrefor, brukt frityrolje
- MHSERVICE: Mais
- Bunker Oil: Slakteavfall uegnet til dyrefor, brukt frityrolje
- Eco-1: Slakteavfall uegnet til dyrefor, brukt frity, POME (palm oil mill. effluent)
- Biofuel Express: Animalske biprodukter, raps
- Driv Energi: Slakteavfall uegnet til dyrefor, brukt frityrolje, mais
- Energifabrikken: Animalske biprodukter, brukt frityrolje, raps

Det ble omsatt 2,6 millioner liter avansert biodrivstoff i luftfart i Norge i 2021. Biodrivstoffet var laget av slakteavfall som ikke kan brukes til dyrefôr og brukt frityrolje fra næringsmiddelindustrien. Råstoffene kom hovedsakelig fra Europa (86 %), men også noe fra Sørøst-Asia (8 %) og Sør-Amerika (2 %).

I tillegg til biodrivstoff finnes det også ikke-fossile syntetiske drivstofftyper, som også regnes som fornybare, da disse er kunstig fremstilt ved bruk av utslippsfrie energikilder.

## 4.2 Tiltaksbehov i infrastrukturen

Ved bruk av HVO-100, eller tilsvarende drivstoff, vil det ikke være behov for investeringer i infrastruktur i dette alternativet. Grunnen for dette er at dagens infrastruktur for tankanlegg kan benytte HVO-100 istedenfor fossil diesel. Anbefalt lagringstid er 12 måneder som for andre fossile dieselkvaliteter [6].

## 4.3 Tiltaksbehov i kjøretøyflåten

Ved bruk av HVO-100, eller tilsvarende drivstoff, vil det ikke være behov for investeringer i kjøretøyflåten i dette alternativet. HVO-100 er et fossilfritt drivstoff av høyeste kvalitet som reduserer klimagassutslippet med opptil 90 % og fungerer utmerket i alle dieseldrevne motorer uten spesialtilpasning [7].

## 4.4 Tekniske løsninger som er lagt til grunn i alternativanalysen

Driftsopplegg blir som for referansealternativet ved bruk av HVO-100. For andre aktuelle drivstofftyper er driftsegenskapene beskrevet i Tabell 5, og kan gi behov for tilpasning av kjøretøy og tankanlegg, eksempelvis oppvarming av tanker, filtre og lignende.

## 4.5 Teknologisk modenhet og forventet utviklingsløp

Tabellen nedenfor angir noen aktuelle ikke-fossile drivstofftyper, modenhetsnivå (Technical Readiness Level), representativ CO<sub>2</sub>-reduksjon og deres egenskaper for eventuell bruk på jernbane.

Tabell 5 Ikke-fossile drivstofftyper: Tabellen angir de mest aktuelle drivstofftypene med modenhetsnivå (TRL), typisk CO<sub>2</sub>-reduksjon, fordeler og ulemper.

Type	TRL	CO <sub>2</sub> -red.	Fordeler	Ulemper
HVO-100	9	75-90 % [8], [9]	<p>Kuldebestandig</p> <p>Lavere klimagassutslipp enn fossil diesel, da det er laget av biologiske råvarer.</p> <p>Kan redusere luftforurensning, som kan forbedre luftkvaliteten og redusere helseproblemer.</p> <p>Kan brukes i eksisterende dieselmotorer uten modifikasjoner, noe som kan redusere kostnadene ved å erstatte fossil diesel.</p> <p>Kan produseres fra en rekke ulike råvarer, noe som kan øke tilgjengeligheten og redusere avhengigheten av import av fossil diesel.</p>	<p>Prisen på HVO-100 kan være høyere enn prisen på fossil diesel, noe som kan begrense dens bruk.</p> <p>Kan kreve store mengder land og vann for produksjonen, og kan konkurrere med matproduksjon.</p> <p>Produksjon kan føre til avskoging og tap av biologisk mangfold hvis ikke det håndteres på en bærekraftig måte.</p> <p>Kan ha høyere CO<sub>2</sub>-utslipp over livsløpet sammenlignet med andre biodiesel varianter, da det er laget av palmekjemikalier som kan føre til avskoging og negative konsekvenser for miljøet.</p>
FAME	9	Inntil 90 % (raps)  60-75 % (soya)	<p>Lavere klimagassutslipp enn fossil diesel, da det er laget av biologiske råvarer.</p> <p>Kan redusere luftforurensning, som kan forbedre luftkvaliteten og redusere helseproblemer.</p> <p>Kan brukes i eksisterende dieselmotorer uten modifikasjoner, noe som kan redusere kostnadene ved å erstatte fossil diesel.</p> <p>Kan produseres fra en rekke ulike råvarer, noe som kan øke tilgjengeligheten og redusere avhengigheten av import av fossil diesel.</p>	<p>Prisen kan være høyere enn prisen på fossil diesel, noe som kan begrense dens bruk.</p> <p>Kan kreve store mengder land og vann for produksjonen, og kan konkurrere med matproduksjon.</p> <p>Produksjon kan føre til avskoging og tap av biologisk mangfold hvis ikke det håndteres på en bærekraftig måte.</p> <p>Kan ha høyere CO<sub>2</sub>-utslipp over livsløpet sammenlignet med andre biodiesel varianter, da det er laget av palmekjemikalier som kan føre til avskoging og negative konsekvenser for miljøet.</p> <p>Kan kreve spesielle lagring forhold for å unngå forringelse av drivstoffet.</p>
ED-95	8-9	Minst 70 % (trær og avfall)  Minst 60 % (korn)	<p>Etanol-diesel kan redusere klimagassutslippene sammenlignet med fossil diesel.</p> <p>Etanol-diesel kan produseres lokalt ved hjelp av biologiske råvarer som sukkerrør, melasse eller mais</p>	<p>Produksjonen av etanol-diesel kan føre til avskoging og tap av biologisk mangfold hvis ikke det håndteres på en bærekraftig måte.</p> <p>Prisen på etanol-diesel kan være høyere enn prisen på fossil diesel, noe som kan begrense dens bruk.</p> <p>Etanol-diesel kan kreve store mengder land og vann for produksjonen, og kan konkurrere med matproduksjon.</p> <p>Etanol-diesel har ofte lavere energiinnhold enn fossil diesel, noe som kan føre til økt forbruk og høyere kostnader</p>



B100 RME	9	70 %	<p>Har lavere klimagassutslipp enn fossil diesel, da det er laget av biologiske råvarer.</p> <p>Kan redusere luftforurensning, som kan forbedre luftkvaliteten og redusere helseproblemer.</p> <p>Kan produseres fra raps, som er en av de mest produktive og effektive råvarene for biodieselproduksjon og som har høyere energieffektivitet og lavere CO<sub>2</sub>utslipp over livsløpet sammenlignet med andre råvarer.</p>	<p>Kan kreve store mengder land og vann for produksjonen, og kan konkurrere med matproduksjon.</p> <p>Kan være dyrere å produsere enn andre typer biodiesel, noe som kan begrense dens bruk.</p> <p>Kan kreve spesielle lagring forhold for å unngå forringelse av drivstoffet.</p> <p>Kan ikke brukes i alle dieselmotorer uten modifikasjoner, noe som kan øke kostnadene ved å erstatte fossil diesel.</p>
Syntetisk diesel (eFuel)	4-6		Lavt CO <sub>2</sub> -utslipp, kan brukes i eksisterende dieselmotorer.	Høye produksjonskostnader, kompleks produksjonsprosess.

Gjennom Jernbanedirektoratets offisielle henvendelse til markedet (RFI) fremkommer det at dieseldrevne kjøretøy ikke er noe leverandørene kommer til å legge vekt på videre utvikling av. På lengre sikt vil derfor markedet for dieselteknologi antas å bli redusert.

#### 4.6 Konsekvenser for togtrafikken

Det må antas at konseptet teknisk sett ikke forårsaker nevneverdige endringer i effekter for togtrafikken, dersom drivstoff tilsvarende HVO-100 benyttes. Prisøkningen vil imidlertid kunne bidra til utfordringer i konkurransesituasjonen for godstrafikk og for behovet for statlige tilskudd til persontrafikken.

#### 4.7 Mulig tidsplan for innføring av alternativet

Avhengig av valgt drivstofftype kan alternativet innføres på meget kort tid, da den eneste endringen i praksis blir å bestille nytt drivstoff til dagens tankanlegg. For HVO-100 opplyser leverandørene at dette er et likeverdig drivstoff som både kan lagres og benyttes på lik linje med ordinær diesel. Om det likevel skulle bli behov for noen justeringer antas det ikke å være av stort omfang (utskifting av silikonpakninger og lignende).

Det som kan forventes å kreve tid ved innføring av dette konseptet vil være avklaring av hvordan man skal pålegge/subsidiere aktørene på jernbanen til å gå over til en dyrere energikilde, hvem som skal ta regningen, og hva det vil si for konkurranseforholdet mot transportmidler som ikke pålegges en overgang til andre transportmidler.

#### 4.8 Kostnader

Kostnader knyttet til kjøretøy og infrastruktur vil være som for referansealternativet.

Energikostnadene vil være vesentlig dyrere enn referansealternativet.

#### 4.9 Oppnåelse av effektmål

Flytende biodrivstoff er et viktig tiltak for å nå nasjonale klimamål, men avansert biodrivstoff<sup>4</sup> er en svært begrenset ressurs og har en høy kostnad. Det forventes fortsatt høye priser framover, og Miljødirektoratet

<sup>4</sup> I norsk regelverk skiller vi på avansert og konvensjonelt biodrivstoff, som er basert på hvilke råstoff biodrivstoffet er laget av. Konvensjonelt biodrivstoff er laget av råstoff som også kan brukes til mat og fôr (f.eks. raps og palmeolje). Avansert biodrivstoff er hovedsakelig laget av råstoff som er avfall og rester, og skal ikke være i direkte konflikt med mat- og fôrproduksjon. Avansert biodrivstoff har generelt sett bedre bærekraftsegenskaper, og Miljødirektoratet anbefaler at all økt bruk av biodrivstoff bør være avansert.

har beregnet den samfunnsøkonomiske tiltakskostnaden for avansert biodrivstoff for perioden 2023-2030 til over 4000 kr/tonn CO<sub>2</sub> redusert. Samtidig er det få eller ingen tekniske barrierer for å bruke biodrivstoff som erstatning for fossile energiprodukter, og det kan blandes inn i fossilt drivstoff. Ressursknappheten på råstoffene som kan brukes til bærekraftig produksjon av avansert biodrivstoff vil imidlertid utgjøre en barriere på lengre sikt. En analyse av Argus Media viser at global produksjon av avansert biodiesel (HVO og andre typer biodiesel) er under 8 milliarder liter i 2023, og estimert til å kunne øke til 15 milliarder liter i 2035. Til sammenligning var totalt salg av drivstoff i Norge på omtrent 8,3 milliarder liter i 2021, ifølge SSB [10]. Knapphet på bærekraftig biomasse gjelder for avansert biodrivstoff. Det er i dag svært begrenset produksjon av avansert biodrivstoff. Rester og avfall som brukes til å lage flytende avansert biodrivstoff er også stort sett svært knappe ressurser. Den globale produksjonen av avansert biodrivstoff er forventet å øke, men det er også ventet sterk økning i etterspørselen globalt. Avanserte råstoff har i tillegg mange andre bruksområder, og det er knapphet på arealer til biomasseproduksjon globalt.

Omsetningskrav er et virkemiddel som er krevende å kombinere med andre virkemidler som fremmer bruk av flytende biodrivstoff. Dersom aktører ønsker å bruke 100 % biodrivstoff, for eksempel for å oppnå sektormål eller lokale klimamål, og dette volumet også blir brukt til å oppfylle et omsetningskrav, vil det ikke føre til en økning av totalt volum biodrivstoff i Norge. Dette betyr i praksis at de som kjøper inn biodrivstoff betaler for å bruke biodrivstoffet, men uten at det fører til reelle utslippsreduksjoner nasjonalt eller globalt. På grunn av dette, har flere aktører ønsket et system for bruk av biodrivstoff utenfor omsetningskravet. Miljødirektoratet har laget en egen publikasjon om dette temaet [11]. Det er kjent at enkelte drivstoffomsettere tilbyr dette i dag.

Miljødirektoratet har gjort flere vurderinger av virkemidler for bruk av flytende biodrivstoff, og vurderer at dersom man ønsker økt bruk av flytende biodrivstoff, så er en nasjonal regulering, som omsetningskrav, det mest hensiktsmessige virkemiddelet. Denne vurderingen er generell og gjelder selv om det utvikles et system utover omsetningskravet. En regulering som omsetningskrav kan innrettes styringseffektivt opp mot nasjonale klimamål og -forpliktelser. Nasjonale reguleringer gir også større forutsigbarhet for biodrivstoffprodusenter enn enkeltanskaffelser, noe som er en viktig forutsetning for investeringsbeslutninger i ny biodrivstoffproduksjon. I tillegg sørger omsetningskrav for at bærekraftkriterier og klassifisering av ulike typer råstoff reguleres mer treffsikkert og på et overordnet nivå. Kriteriene er basert på omfattende EU-prosesser, og i de fleste tilfeller vil kunder/aktører som kjøper biodrivstoff ha begrenset kunnskap om biodrivstoff og bærekraftkriteriene.

Fordi bærekraftig råstoff til å produsere biodrivstoff er en særlig knapp ressurs, er det også svært viktig å prioritere andre tiltak der det er mulig for å sikre langsiktig omstilling til et nullutslippssamfunn. Rendyrkning av omsetningskrav som virkemiddel for flytende biodrivstoff kan ha en positiv omstillingseffekt ved at andre virkemidler kan spisses slik at de fremmer teknologier og løsninger som bidrar til langsiktig omstilling, som f.eks. logistikktiltak og utslippsfrie teknologier. Oppsummert, så er klimaeffekten og bærekraftsegenskapene til avansert biodrivstoff generelt sett bedre enn konvensjonelt biodrivstoff, men avanserte råstoff er knappe ressurser. Det vil være en fordel at jernbanen ikke benytter en uforholdsmessig stor andel av slikt drivstoff – som kan være nødvendig for omstilling i andre sektorer.

Dette er bakgrunnen for at arbeidsgruppen for Klima og miljø i utredningsoppdraget i Nasjonal transportplan anbefalte at bruken av flytende biodrivstoff i anleggssektoren reguleres gjennom det nasjonale omsetningskravet for ikke-veigående maskiner. Det vises til vedlegget "Klima og miljø" til leveransen på utredningsoppdraget i NTP for nærmere vurdering av dette [12].

#### **4.9.1 Reduserte klimagassutslipp innen 2030**

Som følge av at merforbruk av ikke-fossil diesel vil nulles ut i totalregnskapet, vil alternativet ikke gi reduserte klimagassutslipp i transportsektoren. Staten vil mer effektivt kunne påvirke samfunnets bruk av ikke-fossile drivstofftyper gjennom innblandingskravet i transportsektoren enn gjennom sektorvise tiltak om benyttelse av 100% ikke-fossile drivstofftyper.

Utslipet er beregnet til 70 000 tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter per år, basert på togtilbudet i referansealternativet og definert kjøremønster i utredningens energisimuleringer.

#### 4.9.2 Reduserte klimagassutslipp innen 2050

Som følge av at merforbruk av ikke-fossil diesel vil nulles ut i totalregnskapet vil alternativet heller ikke gi reduserte klimagassutslipp i transportsektoren. Det er imidlertid større usikkerhet knyttet til perioden 2030 til 2050, som følge av at tilnærming og tilhørende regelverk kan endres.

Utslipet er beregnet til 70 000 tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter per år, basert på togtilbudet i referansealternativet og definert kjøremønster i utredningens energisimuleringer.

#### 4.9.3 Energieffektivitet

Energieffektiviteten er omtrent som for 0-alternativet, men kan variere noe i forhold til hvilken drivstofftype som velges.

Ikke-fossil diesel er i dag en vesentlig knappere ressurs enn fossil diesel. Det forventes stor etterspørsel etter ikke-fossile drivstofftyper til bruk i sektorer som ikke kan benytte batteriteknologi som følge av vektbegrensninger, og for å tilfredsstille det økende innblandingskravet i ordinære fossile drivstofftyper.

#### 4.9.4 Togtilbudets attraktivitet

Togtilbudets attraktivitet vil være som for referansealternativet.

#### 4.9.5 Oppsummering av alternativets effektmåloppnåelse

Alternativet scorer på de fleste områder likt som referansealternativet, men dårligere en referanse på forbruk av knappe ressurser.

Tabell 6 Effektmåloppnåelse for alternativ 1a

Effektmål	Vurderingsmetode	Måleenhet	Verdi (avrundet)	Relativ skår
1. Utslipp innen 2030	Beregnet CO <sub>2</sub> -utslipp	Tonn CO <sub>2</sub> e årlig gjennomsnitt 2023-2029	70 000	0
2. Utslipp innen 2050	Beregnet CO <sub>2</sub> -utslipp	Tonn CO <sub>2</sub> e årlig gjennomsnitt 2030-2049	70 000	0
3. Energieffektivitet	Energieffektivitet WTW	Prosentvurdering	Variabelt	0
	Forbruk av knappe ressurser	Kvalitativ vurdering	4 % av avansert biodrivstofforbruk i Norge	--
4. Attraktivitet	Akselerasjonsevne	Kvalitativ vurdering	Som 0-alt.	0
	Trekraft	Kvalitativ vurdering	Som 0-alt.	0
	Lade-og-tankestop	Kvalitativ vurdering	Som 0-alt.	0
	Effektiv toglengde	Kvalitativ vurdering	Som 0-alt.	0
	Aksellast	Kvalitativ vurdering	Som 0-alt.	0

#### 4.10 Tilfredsstillelse av rammebetingelser

Alternativet har samme utfordringer i rammebetingelser som referansealternativet. Faktorene er ikke beskrevet ytterligere som følge av at alternativet siles ut.

#### **4.11 Oppsummering**

Konseptet siles ut som følge av ingen, eller negativ, effektmåloppnåelse. Vurdering innebærer at Konseptet som helhet fremstår som dårligere enn 0-alternativet. Det er derfor ikke gjennomført kostnadsestimater, usikkerhetsanalyse etc. for dette alternativet.

Av markedsmessige eller andre kommersielle grunner kan det likevel være aktuelt for noen togselskaper i en overgangsperiode å benytte ikke-fossil diesel, selv om det ikke reduserer klimagassutslippene. Det vil i så fall være opp til aktørene å gjennomføre på egen hånd, dersom det anses hensiktsmessig.

# 5 Alternativ 1b – Ikke-fossil diesel med del-elektrifisering

## 5.1 Beskrivelse av energibærer

Alternativet er en variant av konsept 1. Det bygger på referansealternativet/null-alternativet, og innebærer skifte av drivstoff til ikke-fossil type på eksisterende jernbånekjøretøy. I tillegg innebærer alternativet at man elektrifiserer enkelte strekninger med lav investeringskostnad (strekninger uten tunneller, lave fagverksjernbanebruer og lave overgangsbruer) og stort strømutvekslingsbehov (store høydeforskjeller), for å avdekke om en slik løsning kan være lønnsom ved bruk av bimodale kjøretøy som kan benytte både flytende drivstoff og elektrisitet som energibærer.

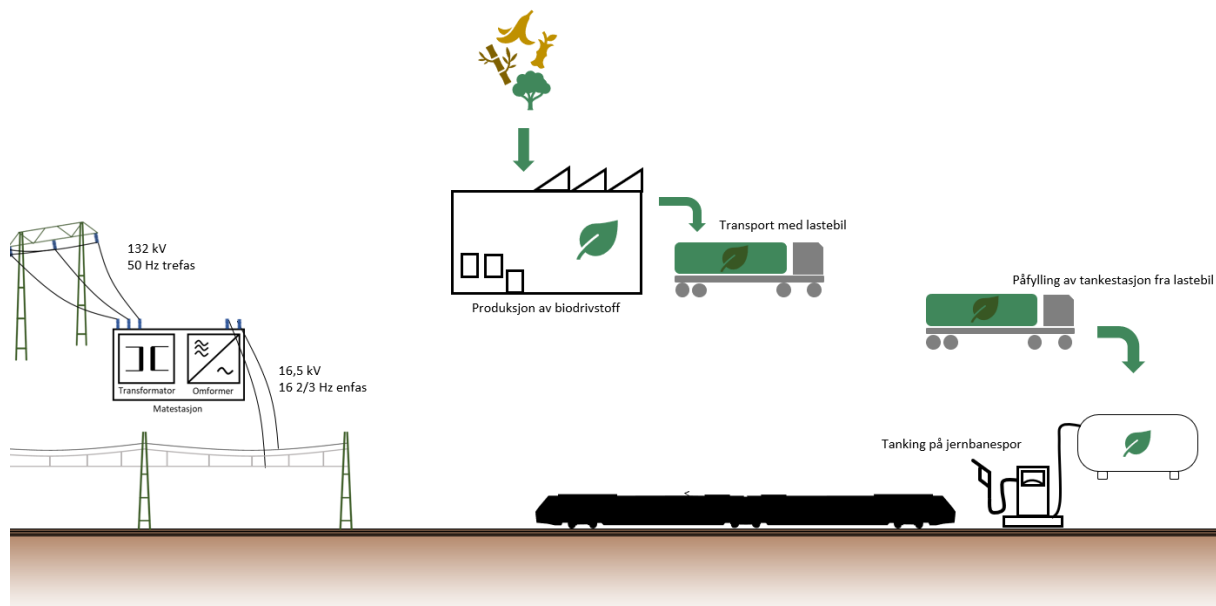
## 5.2 Drøfting

Som følge av at konseptet falt ut under utredning av alternativ 1a, drøftes alternativ 1b ikke videre.

## 5.3 Oppsummering

Alternativet siles ut, på lik linje med alternativ 1a.

## 1b Ikke-fossil diesel med del-elektrifisering



Figur 11 Illustrasjon av alternativ 1b

# 6 Alternativ 2a – Hydrogen

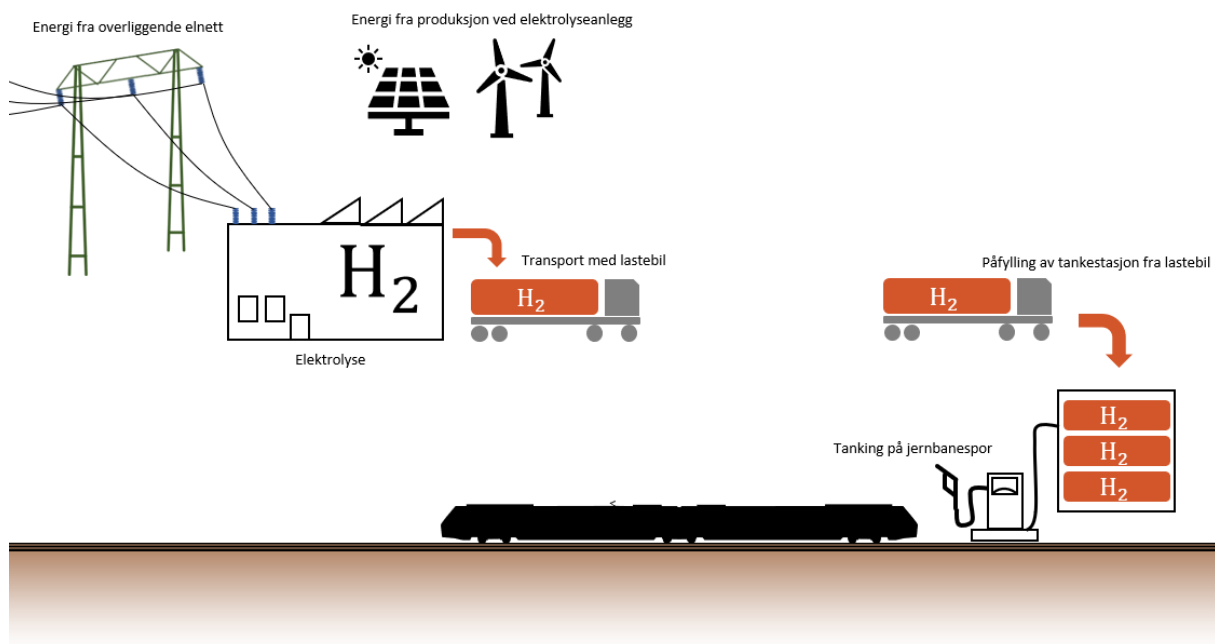
## 2a Hydrogen

### 6.1 Beskrivelse av energibærer

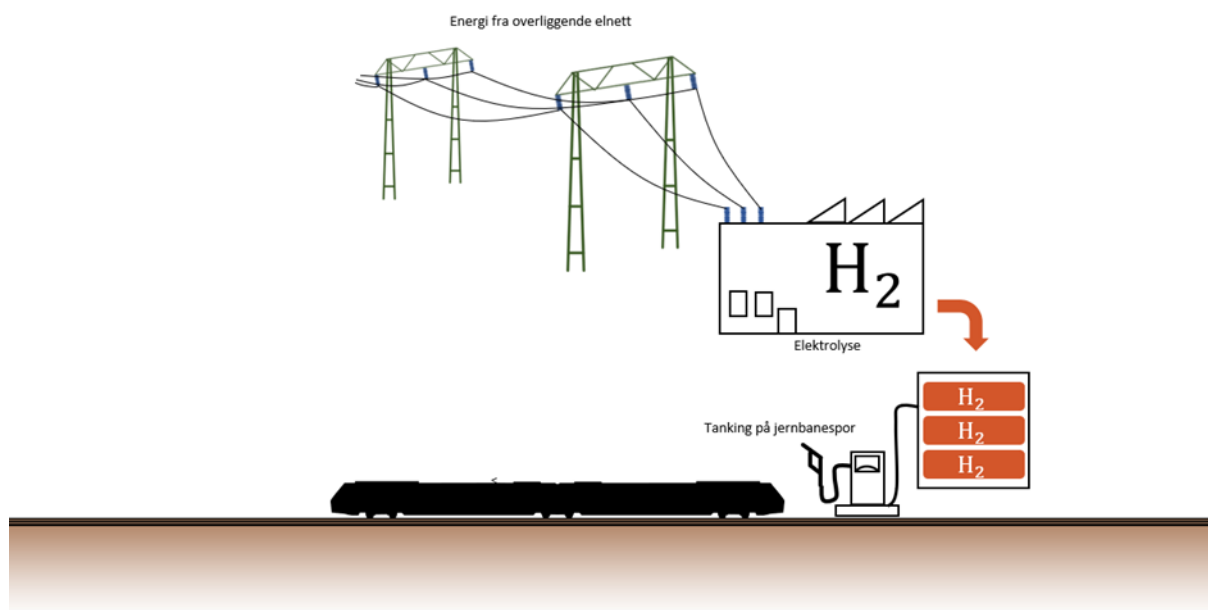
Alternativ 2a omhandler energibærer basert på grunnstoffet hydrogen, som vil kunne erstatte diesel og andre fossilbaserte drivstoff for jernbanen. Konseptet vil bestå av hydrogentanker, brenselceller, et batteri og en elektrisk motor om bord på kjøretøyene, og infrastruktur for fylling av hydrogen.

Verdikjeden består av flere viktige prosesser før hydrogen kan fylles på tanken til kjøretøyet, og det finnes flere aktuelle løsninger knyttet til produksjon, logistikk og teknologi.

Ombord på kjøretøyet vil hydrogen føres fra tankene og gjennom brenselcellen, hvor det produseres elektrisk energi, varme og vann. Produsert elektrisk energi fordeles parallelt til en elektrisk motor for traksjon og et elektrisk batteri for mellomlagring av energi. Dette sikrer fremdrift av kjøretøyet. Et hydrogentog kan beskrives som et batterielektrisk kjøretøy med en hydrogendrevet batterilader. Om kjøretøyet også er hybrid har det i tillegg en kontaktledningsbasert batterilader.



Figur 12 Illustrasjon av alternativ 2a, sentral produksjon av hydrogen, som transporteres til jernbanens tankanlegg.



Figur 13 Illustrasjon av alternativ 2a, lokal produksjon av hydrogen, ved jernbanens tankanlegg.

### 6.1.1 Om hydrogen

Hydrogen ble oppdaget på 1700-tallet og ble tidlig kalt «brennbar luft». Hydrogen er ved normal temperatur og trykk en farge- og luktfri gass. Hydrogen er det letteste grunnstoffet, har høy energitetthet per masseenheter, men lav energitetthet per volumenheter i en gasstank, slik at praktisk bruk av hydrogen gass er knyttet til svært høye lagringstrykk (standarder for dette er i dag mellom 350-1000 bar). Hydrogen er en energibærer, ikke en energikilde, og må på lik linje med andre energibærere, for eksempel bensin, elektrisitet og fjernvarme, produseres fra en energikilde. Disse produksjonsprosessene krever energi og medfører energitap. Dette gjør hydrogen mer kostbart enn å bruke f.eks. elektrisitet direkte. Det brukes i dag om lag 70 mill. tonn i året av hydrogen globalt, hovedsakelig i kjemisk industri og i oljeraffinerer. Om lag 90% av hydrogenet som brukes i Europa produseres i dag fra naturgass, noe som medfører betydelige klimagassutslipp. For at hydrogen skal være en lav- eller utslippsfri energibærer må det produseres med ingen eller svært lave utslipp. Dette kan skje enten ved elektrolyse av vann fra fornybar kraft, eller fra naturgass eller andre fossile kilder med CO<sub>2</sub>-håndtering.<sup>5</sup> Hydrogenproduksjon fra fossile energikilder, naturgass og kull, skjer i dag uten fangst og -lagring av CO<sub>2</sub>. Globalt medfører dette utslipp på om lag 830 mill. tonn CO<sub>2</sub> per år<sup>6</sup>, som tilsvarer om lag de totale klimagassutslippene fra Tyskland i 2018.

Dagens produsenter av hydrogen jobber med teknologi for karbonfangst (CCS). Det muliggjør fortsatt produksjon av hydrogen fra naturgass, men uten tilsvarende klimagassutslipp. Denne teknologien finnes foreløpig bare i liten skala, og er foreløpig ikke tatt i bruk i hovedproduksjonen. Hydrogen kan også produseres ved elektrolyse, men dette er ikke den dominerende produksjonsmetoden, ettersom produksjonskostnadene er høye og storskala produksjon basert på elektrolyse krever tilgang på store mengder elektrisk kraft. Elektrolyse krever rundt ni liter vann for å kunne produsere en kilo hydrogen. Metoden har imidlertid vekst innen småskalaproduksjon og på steder der det finnes elektrisk kraft som er vanskelig å utnytte på andre måter.

Hydrogen brukes i dag industrielt i produksjon av ammoniakk og kunstgjødsel. Ettersom transport og lagring av hydrogen er vurdert som vanskelig, dyrt og risikofyllt, skjer store deler av den globale produksjonen på samme sted som den forbrukes av de industrielle brukerne. Bruk av hydrogen utenfor industrien er svært begrenset og må betraktes som småskala bruk. Denne bruken omfatter i dag blant annet bruk i et begrenset antall personbiler, lastebiler, tog og ferger. Mye av produksjonen til denne bruken er basert på elektrolyse, men har foreløpig en så liten utbredelse at det ikke påvirker de totale elektrisitetsbehovet nevneverdig.

<sup>5</sup> Regjeringens hydrogenstrategi

<sup>6</sup> IEA (2019), The Future of Hydrogen

Hydrogen har en svært lav fordampningstemperatur, og dersom den skal oppbevares eller transporteres i flytende form så vil dette måtte gjøres ved svært lave temperaturer (-253 C fordampningstemperatur atmosfærisk), noe som setter høye krav til isolering av installasjoner. Hydrogen er svært reaktivt, og har stor evne til å reagere med veldig mange andre stoffer. Hydrogen i ren form krever ekstremt lite energi for å antenne, og hydrogengass har en brennbarhet i blanding med luft som er betydelig større enn hva man finner for hydrokarbongasser det er naturlig å sammenligne med. Gassen er imidlertid svært lett og vil, dersom den ikke er i et innelukket areal, raskt tynnes ut. Utslipp av hydrogen som antennes umiddelbart vil oppføre seg omtrent som en ordinær gassbrann, med unntak av at flammen ofte ikke er synlig for de som er i nærheten. Utslipp som ikke antennes umiddelbart, eller tynnes raskt nok ut, har lettere enn de fleste andre stoffer for å forårsake eksplosjoner. Hydrogen er tennbar i blanding med luft i konsentrasjon fra 4 til 75 % av volumet, og sammenliknet med andre brannfarlige stoffer kreves svært lav energi for å antenne gassen. For eksempel kan hydrogengass antennes av statisk utladning fra klær og utstyr, eller fra statisk elektrisitet generert av selve utslippet.

### **6.1.2 Hydrogen som energibærer for jernbane**

Hydrogen som energibærer for tog har utviklet seg mye siden midten av 1990-tallet da det i Canada ble utviklet og testet et konsept for hydrogenlokomotiv til gruvedrift. Senere har det blitt gjennomført en rekke test- og pilotprosjekter for hydrogen for skinnegående kjøretøy. I dag er det flere prosjekter som pågår både i Europa og rundt om i verden for å teste ut hydrogen som energibærer for jernbane.

Tilgang til grønt hydrogen er selve bærebjelken i en nullutslippsverdikjede basert på hydrogen, og vil ha stor betydning for hvor raskt hydrogenbaserte løsninger kan implementeres, og kostnaden ved å implementere dem. Særlig de siste ti årene har behovet for utslippsfrie energikilder og -bærere med rekkevidde utover det som kan leveres fra rene batteriløsninger bidratt til utvikling og testing av hydrogenbaserte drivlinjer og infrastruktur. Utvalget av jernbanekjøretøy som bruker hydrogen som energibærer er foreløpig begrenset, og dreier seg i hovedsak om mindre motorvognsett. Antallet produsenter som tilbyr slike kjøretøy med europeisk standard er imidlertid økende.

Alle kjente prosjekter med bruk av hydrogen på jernbane er til nå finansiert med en andel offentlig støtte. Prosjektet som har kommet lengst er prøveprosjektet med hydrogendrift der Lower Saxony Regional Transport Company (LNVG) er oppdragsgiver. Der er nå 14 to-vogners regiontog av typen iLint fra Alstom i daglig drift, og det er etablert et permanent fyllleanlegg i Bremervörde. Driften av iLint i Tyskland har sterk politisk støtte, er subsidiert på flere nivåer, og er fra oppdragsgiver per definisjon et prøveprosjekt de kjører for å vurdere teknologien frem mot den dagen de blir nødt til å erstatte sin dieselflåte på et par hundre kjøretøy. Sommeren 2023 konkluderte de med at de vil erstatte resten av kjøretøyflåten med batteri-elektriske motorvognsett, som følge av høye driftskostnader til hydrogenkjøretøyene.

Forutsetningen for at hydrogendrift kan betraktes som miljøvennlig, er at den er basert på produksjon av grønt hydrogen. Tilgang til store mengder fornybar energi og vann er en forutsetning for å kunne produsere grønt hydrogen i stor skala. Statnetts kortsiktige markedsanalyse for 2022-2027 trekker særlig frem at utviklingen i kraftforbruk går raskere enn utbygging av ny kraft. I perioden er kraftforbruket ventet å øke med 27 TWh, mens ny produksjon er ventet å være på kun 6 TWh. Statnett venter at Norge vil oppleve kraftunderskudd i et normalår allerede fra 2027, og at Norge i perioder vil være avhengige av å importere kraft fra våre naboland. For Norden samlet er det forventet et kraftoverskudd på 50 TWh i 2027, men det europeiske kraftunderskuddet er, på grunn av krigen i Ukraina og bortfallet av russisk gass, på mer enn 1500 TWh. Statnetts prognoser indikerer at det ikke vil være nok tilgjengelig kraft til alle som har meldt inn behov for ny kapasitet. Det er derfor en usikkerhet knyttet til realismen i en rekke av planene som foreligger for etablering av hydrogenproduksjonsanlegg.

En vesentlig årsak til at hydrogenkonseptet vurderes, er de antatt lave behovene for investeringer sammenliknet med kostnadene for elektrifisering av infrastruktur og tilpasninger i driften. Forhold knyttet til hensynet til sikker drift og håndtering gjør imidlertid at det er en viss usikkerhet rundt kostnadsnivåer.

For en overgang til hydrogen som energibærer vil det være behov for nye eller ombygde kjøretøy, en produksjons- og forsyningskjede som kan levere hydrogen som drivstoff, og tilpassinger i fasiliteter for reparasjoner og vedlikehold. I tillegg kan det være behov for å gjøre endringer eller tilpasninger for sikkerhet og beredskap.



## 6.2 Tiltaksbehov i infrastrukturen

Anlegg for produksjon, lagring, omtapping og fylling av hydrogen vil, i tillegg til sikkerhetssoner, kreve relativt store areal. Behovet for sikkerhetssoner avhenger av hydrogenmengden som skal lagres, type teknologi og lagringsform. Dette kan være en begrensende eller fordyrende faktor.

Bruk av hydrogen og hydrogenbaserte løsninger skal være trygt. Sikker bruk er helt avgjørende for at aktuelle brukere skal ta i bruk hydrogen, slik at hydrogen og hydrogenbaserte løsninger kan være reelle alternativer. Bruk av hydrogen som energibærer krever i prinsippet bare etablering av fyllestasjoner, dersom det legges til grunn at hydrogen vil være tilgjengelig i et marked som kan levere ønsket kvanta og kvalitet på de lokasjoner jernbanen etterspør.

Hydrogen sine spesielle egenskaper, i form av at den enten er en svært reaktiv, brennbar og eksplosjonsfarlig gass som lagres under ekstremt høyt trykk, eller en væske som lagres ved ekstremt lav temperatur, gjør at det alltid vil være et behov for å sikre nødvendige tiltak for å hindre eller redusere konsekvensen av uønskede hendelser med hydrogen.

Behov for særskilte tiltak i tunneler, på stasjoner, i verksteder eller andre innelukkede arealer der større mengder hydrogen tas inn, er et tema som stadig diskuteres i tilknytning til bruk av hydrogen. Enkelte aktører mener det ikke er behov for noen form for tiltak, mens andre mener at det ikke finnes gode nok tiltak til at dette kan gjøres på en forsvarlig måte som ivaretar personsikkerheten.

For at hydrogen skal kunne være et reelt alternativ som kan vurderes, er det i denne analysen lagt som en forutsetning at det finnes tiltak som kan etablere et sikkerhetsnivå rundt bruken av hydrogen som gir en akseptabel risiko.

Siden bruken av hydrogen som energibærer i transport ikke er særlig utbredt, knytter det seg stor usikkerhet til hvilke sikkerhetstiltak som vil være nødvendige. Historisk er alvorlige ulykker blant de viktigste driverne for videreutvikling av sikkerhetsregelverk. Diskusjonen rundt dette vil trolig vedvare til utbredelsen av hydrogen som energibærer har et større omfang og erfaringsgrunnlaget med ulykker er større. På det nåværende tidspunkt er det enten «føre var» som gir meget omfattende tiltak, eller «vent å se» som ikke gir noen vesentlige krav til tiltak før det skjer hendelser, som er de to mest aktuelle tilnærmingene til tiltak. Ulikheten i de to tilnærmingene medfører en stor usikkerhet om tiltaksbehov og dermed også investeringsbehov.

I tunneler, verksteder og andre innelukkede arealer der hydrogen oppbevares eller håndteres kan gassdeteksjon, tennkilde-kontroll, eksplosjonsavlasting, konstruksjonsforsterking og ventilering være aktuelle tiltakskategorier. Hva som er nødvendig innen hvert enkelt område vil kunne variere, og må komme som et resultat av nødvendige risikoanalyser. Disse problemstillingene vil måtte utredes nærmere i en senere planfase for å redusere usikkerheten.

Det er i denne analysen ikke lagt inn kostnader for tiltak for tunneler eller overbyggede stasjoner, men for verksteder er det lagt inn en begrenset tiltakspakke. Dette gir en risiko for høyere kostnader.

Det betyr at det er en større risiko for økte kostnader enn det er muligheter for reduserte kostnader

### 6.2.1 Fyllestasjon

En hydrogenfyllestasjon er et anlegg der hydrogen mellomlagres og klargjøres for fylling av et kjøretøy. Det finnes en rekke måter å designe et fylleanlegg på. Hvordan man velger å bygge fylleanlegget bestemmes av fire hovedvirkninger; - hva skal man levere ut til kjøretøyet, - hvordan får man hydrogen inn til anlegget, - hvor stort skal mellomlageret være og - hvordan ivaretar man sikkerheten ved anlegget.

I jernbanen har kjøretøyene vi hittil har sett vært basert på at det blir levert gass med ca. 350bar trykk til hydrogenkjøretøyene. Det er derfor lagt til grunn at denne forutsetningen kan benyttes i denne analysen. Hvor mange kjøretøy det skal leveres hydrogen til og hvor stort forbruk disse har må beregnes for hver lokasjon. Dette gjøres i de kommende delkapitlene.

Vi kan i hovedsak få hydrogen inn i fylleanlegget på tre måter:

- Som gass gjennom et rør fra en lokal hydrogenfabrikk eller levert fra jernbane
- Som gass levert med lastebil
- Som væske levert med lastebil.

De ulike metodene gir litt ulike utfordringer. Dersom det skal produseres hydrogen lokalt, må det være plass til å lokalisere en hydrogenfabrikk i umiddelbar nærhet til fylleanlegget og tilgang på nødvendig kraft til å drive et slikt anlegg. Man må også kunne bære investeringskostnadene for anlegget. Dersom man får levert hydrogen med lastebil eller tog som trykksatt gass får man for litt større stasjoner et høyt antall leveranser med bil hver dag. Dette er en krevende logistikk som må håndteres. Dersom man får levert flytende hydrogen med lastebil, så får man en større mengde hydrogen per levering enn for gass, og det blir et lavere antall kjøretøy som må håndteres. Man får da noen prosessmessige ulemper ved at hydrogenet først må gjøres flytende for å transporteres, for så å gjøres om til gass igjen for å brukes på kjøretøyet. Energibehovet ved produksjon av flytende hydrogen er ca. 20% høyere enn for hydrogen i gassform. Løsningen med lokal produksjon er ikke ukjent og brukes en del for de minste anleggene som betjener et begrenset antall veikjøretøy. Vi er ikke kjent med større anlegg som benytter seg av gass tilkjørt med lastebil, men vi er kjent med flere anlegg av en viss størrelse som får levert flytende hydrogen med lastebil.

Fordelene med lokal produksjon er at anlegget er kompakt og at det vil være lettere å ivareta sikkerhet i et kompakt anlegg der det ikke er transport av hydrogen utenfor røranlegget. Disse anleggene kan også få lave produksjonskostnader i områder der man har tilgang på rimelig kraft. Ulempene er imidlertid høyere investeringskostnader og lokalisering utfordringer. Fylleanlegg basert på tilkjørt hydrogen i gassform vil ha store kostnader knyttet til logistikken. Markedsprisen vil derfor være følsom for avstanden mellom hydrogenfabrikk og fylleanlegg. Denne følsomheten vil være noe lavere ved bruk av flytende hydrogen, men til gjengjeld vil konsepter med flytende hydrogen trenge leveranser fra et «flytendegjøringsanlegg» for hydrogen. Slik anlegg er ikke så vanlige, og selv om blant annet et fergeprosjekt i Norge har valgt å fylle flytende hydrogen, så er nærmeste anlegg av denne typen per i dag i Tyskland. Etablering av et slikt anlegg i Norge vil medføre en ekstra investeringskostnad. Basert på dette, er det til tross for usikkerhet om gjennomførbarhet for logistikkoperasjonen og at det ikke er noen andre kjente anlegg av tilsvarende størrelser som gjør det på denne måten, valgt å legge til grunn at hydrogen til fyllestasjonen leveres til fylleanlegget i gassform med lastebil.

Mengden hydrogen i fylleanlegget og kjøretøylengder er avgjørende for hvilket areal anlegget krever, for hvilken prosess som må til for å få tillatelse til å bygge et anlegg, for hvor det kan ligge, og for hvilke sikkerhetstiltak som må benyttes.

Hvor høyt forbruket er, og hvilken robusthet man må ha i forhold til forstyrrelser i logistikken, er viktige faktorer for å angi nødvendig lagringskapasitet i et anlegg.

Det er gjort vurderinger av dette for alle de aktuelle anleggene, og det er angitt en antatt lagerstørrelse basert på en moderat lagerbeholdning i forhold til forbruket.

Det er en tett sammenheng mellom hvor et anlegg ligger og hvilke sikringstiltak som vil være nødvendige. Det kan gjøres både konsekvensreducerende og sannsynlighetsreducerende tiltak knyttet til uønskede hendelser i anlegget. Det må selvfølgelig gjøres en grundig jobb for å forhindre at hydrogen lekker ut ukontrollert. Men siden man i et slikt anlegg aldri helt kan utelukke at noe uønsket oppstår, må det iverksettes tiltak som sikrer at konsekvensen av slike hendelser ikke blir uakseptable.

Det primære konsekvensreducerende tiltaket er lokalisering og avstand til andre verdier. Deretter er det å begrense adgangen til anlegget for alle som ikke har helt nødvendige oppgaver der. Dersom tilstrekkelige avstander ikke kan etableres, så kan konstruksjonsmessige tiltak i en viss utstrekning beskytte mot deler av farene ved å befinne seg i nærheten av en eksplosjon. I andre gasslagringsanlegg er tennkildek kontroll et vesentlig tiltak for å hindre brann og eksplosjon. I hydrogenanlegg er dette mindre relevant, da tennenergien som skal til er så lav at eksplosjonen kan utløses av ikke detekterbare tennkilder som f.eks. statisk elektrisitet. Dette gjør at det er litt vanskeligere enn for andre gasser å estimere hva som vil være en «god» tiltakspakke for et hydrogenanlegg basert på krav stilt til andre gassanlegg. I vår vurdering av arealer og nødvendige sikringstiltak har vi derfor tatt utgangspunkt i hva som er benyttet i Bremervörde -anlegget og skalert anleggene i forhold til dette.

Som følge av arealene som kreves for å få en akseptabel logistikk-løsning for både leveranser og kjøretøy som skal fylles, og en tilfredsstillende sikkerhetsavstand rundt anlegget, er det ikke lagt til grunn at plassering av fyllestasjoner kan gjøres på eksisterende anlegg og spor for påfylling av diesel. Som følge av anleggenes størrelse og krav til sikkerhetsavstander er det lagt til grunn at de legges til eksisterende driftsbanegårder med ledige sporområder, eller til områder langt fra bebyggelse. Det er knyttet stor usikkerhet til nøyaktig plassering, størrelse, utforming og sikkerhetskrav til fyllestasjoner for jernbane.

Dette må gjennomgås grundig i senere utredningsfaser dersom dette alternativet velges. Oversikt over anlegg og antatte tomtekrav for anlegget finnes i vedlegg 13.9

### **6.2.2 Plassering av fyllestasjoner**

Det er lokalisert behov for ni fyllestasjoner for hydrogen, som grunnlag for konseptet. Disse er plassert på Støren, Marienborg (Trondheim), Bodø, Mo i Rana, Dombås, Hamar, Kongsvinger, Steinkjer og Alnabru. Det er noe usikkerhet knyttet til behovet på Alnabru. De andre fyllestasjonene er strategisk plassert på det ikke-elektrifiserte jernbanenettet, og flere har også mulig tilknytning til andre hydrogenprosjekter, slik som Vestfjordsambandet i Bodø, eller den planlagte hydrogenproduksjonen i Mo i Rana<sup>7</sup>.

For plassering av fyllestasjoner for hydrogen er det tatt utgangspunkt i person- og godstogrelasjoner og antall tog i referansealternativet. Det er hensiktsmessig å fylle hydrogen på lokasjoner der hensetting av persontog foregår, på endestasjoner for togpendler, der det foretas driftspause for godstog, samt der det foretas bytte av lokomotiver. Hensetting av persontog foretas som regel i tilknytning til endestasjoner for persontogpendler. Driftspause for strekningslokomotiv til godstog legges som regel i tilknytning til godsterminaler i enden av en godsrelasjon. Det er satt som en forutsetning at bytte av lokomotiv utføres ved overgang mellom elektrifiserte og ikke-elektrifiserte strekninger. Dette gir gode føringer for aktuelle plasseringer av fyllestasjoner. Basert på resultatene fra energisimuleringene er det gjort vurderinger av plassering og størrelse på fyllestasjonene.

Fyllestasjonene er (som vist i Figur 13) plassert på Støren, Marienborg (Trondheim), Bodø, Mo i Rana, Dombås, Hamar, Kongsvinger, Steinkjer og Alnabru.

---

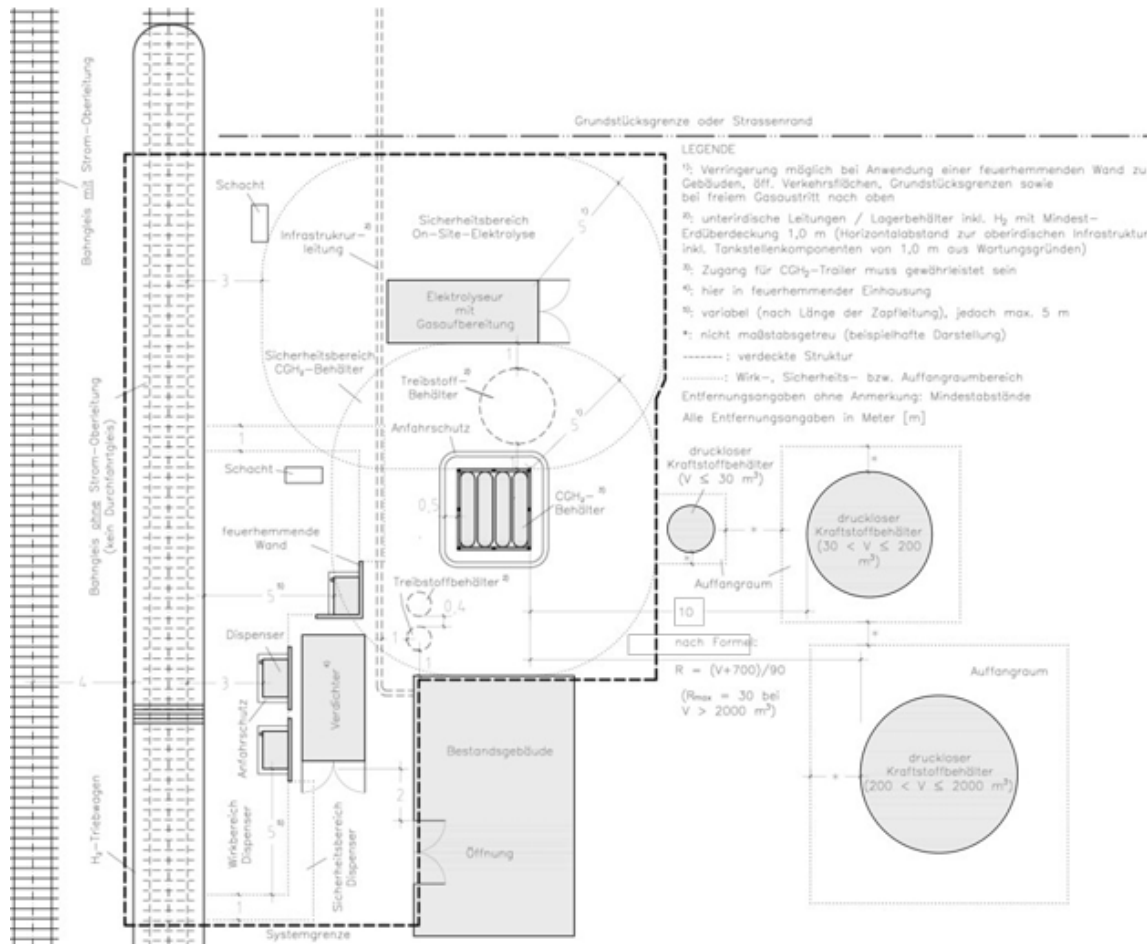
<sup>7</sup> [Hydrogenproduksjon og grønt stål i Mo Industripark \(mip.no\)](https://mip.no)



Figur 14 Hydrogenstrekningene i alternativet, med representativt plasserte hydrogenfyllestasjoner.

### 6.2.3 Sikkerhetstiltak på fyllestasjoner

I tillegg til avsidesliggende plassering og tilstrekkelig tomtestørrelse, er det for anleggene antatt at lagringsenhetene for hydrogengass er beskyttet av et indre vern bestående av kraftige betongvegger og stålporter som sikrer trykkavlastning i sikker retning dersom en eksplosjon skulle oppstå. Dette vil gi beskyttelse av personer som befinner seg i nærheten mot eksplosjonsfare, samtidig som det gir et effektivt vern mot at uønskede personer får adgang til anlegget. Det er også lagt inn full inngjerding av tomt og overvåking av anleggets grenser.



Figur 15 Gjeldende sikkerhetsavstander for komponenter i en hydrogenfyllestasjon Kilde: Bauhaus University Weimar (Thuringia pilot study<sup>8</sup>)

### 6.2.4 Tilgang til fyllestasjoner og tomtelargjøring

Det er lagt til grunn at det vil være behov for eget spor til fylleanlegg for hydrogen for at fyllingen ikke skal skape hindringer for annen togtrafikk. Anlegget vil også måtte ha tilfredsstillende adkomstmuligheter for transport av hydrogen. I tillegg må selve tomten opparbeides for formålet.

Dette er lagt inn i posten "Jernbaneteknisk tilpassing". Siden anleggene ikke er fysisk plassert eller lokalisert er dette svært grove anslag med stor usikkerhet og kan måtte endres i senere planleggingstrinn.

<sup>8</sup>

[https://umwelt.thueringen.de/fileadmin/001\\_TMUEN/Unsere\\_Themen/Energie/Elektromobilitaet/schlussbericht\\_machbarkeitsstudie\\_pilotprojekt\\_h2bz-triebwagen.pdf](https://umwelt.thueringen.de/fileadmin/001_TMUEN/Unsere_Themen/Energie/Elektromobilitaet/schlussbericht_machbarkeitsstudie_pilotprojekt_h2bz-triebwagen.pdf)

### 6.2.5 Energibehov og tomtestørrelser for fylleanlegg

Basert på energisimuleringer er det gjort utregninger av hvor mye hydrogen som bør lagres i de ulike anleggene, og hvor store tomter det er antatt at det vil være behov for. Disse vurderingene tar utgangspunkt i alle toglinjene i referansealternativet, ser på behovet per avgang, og deretter det daglige behovet. Beregningene er gjort med tankmoduler på 600 kg, slik at et behov med for eksempel 1 100 kg vil dekkes av en tank med kapasitet på 1 200 kg. Det er lagt til grunn tankkapasiteter på to dagers (hverdager) forbruk.

Tabell 7 Fyllestasjoner for hydrogen med kapasitet og arealbehov. Kilde: Notat om arealbeslag og behov for nye sidespor til fylling av hydrogen<sup>9</sup>.

Fyllestasjon	Tankstørrelse	Arealbehov
Støren	3 000 kg	7 500 m <sup>2</sup>
Marienburg	7 200 kg	13 000 m <sup>2</sup>
Bodø	9 600 kg	13 000 m <sup>2</sup>
Mo i Rana	1 800 kg	5 000 m <sup>2</sup>
Dombås	1 200 kg	5 000 m <sup>2</sup>
Hamar	3 600 kg	7 500 m <sup>2</sup>
Kongsvinger	5 400 kg	13 000 m <sup>2</sup>
Steinkjer	1 800 kg	7 500 m <sup>2</sup>
Alnabru	1 800 kg	5 000 m <sup>2</sup>

### 6.2.6 Tiltak i verksted

Bygging av et nytt verksted som er tilpasset vedlikehold av kjøretøy som bærer med seg en anseelig mengde brennbar og eksplosiv gass, vil ha de samme grunnleggende kravene som et ordinært verkstedprosjekt. I tillegg må det gjøres tiltak for å tilpasse anlegget til tilstedeværelsen av en eksplosiv gass som er lettere enn luft. Et slikt verksted vil i tillegg til ordinære funksjoner også måtte utføres slik at utslipp av gass under vedlikehold ikke eksploderer. Dersom en eksplosjon likevel skulle oppstå, må bygningene være utført på en måte som gir minimal skade som følge av gasseksplasjonen.

For å hindre at gass som slipper ut i forbindelse med vedlikehold ikke eksploderer, må det etableres eksplosjonssikre soner (EX soner) der alt utstyr og elektriske anlegg er utført på en måte som ikke under noen omstendigheter avgir gnister eller oppnår høye overflatetemperaturer. Videre må bygningen lages slik at brennbare gasser som er lettere enn luft ikke får anledning til å samle seg, men ventileres ut til fri luft. Det må være egne soner for varme arbeider, som er adskilt fra EX-sonen. Anlegget bør også ha overvåknings og varslingssystemer for å detektere og varsle om tilstedeværelse av brennbare gasser. For å sikre at skade som følger av en gasseksplasjon minimaliseres er det tre hovedfunksjoner som må ivaretas.

- Bygningen må ikke kollapse som følge av en eksplosjon
- En eksplosjon må ikke medføre at tredjeparter utsettes for fare
- Personer i bygningen må ha størst mulig sannsynlighet for å overleve en gasseksplasjon i bygget

Alle disse funksjonene dreier seg om trykkavledning ved eksplosjon, og hvor fort og i hvilken retning trykket kan avledes. I denne konteksten vil en trykkavledning oppover sannsynligvis være gunstig, noe som medfører at bygget må utføres med en sterk struktur i veggene som kan motstå en viss mengde trykk, kombinert med en tilstrekkelig mengde svake områder i taket som kan blåses ut uten at det medfører fare for tredjepart ved at bygningsdeler faller ned. Jernbanedirektoratet har gjort en vurdering av eksisterende

<sup>9</sup> Notat om arealbeslag og behov for nye sidespor til fylling av hydrogen

verkstedbygninger i Norge, og har ikke funnet noen bygninger som umiddelbart fremstår som egnet for tilpassing til å vedlikeholde tog med hydrogen som energibærer i.<sup>10</sup>

Tiltaksbehov i verksteder vil kunne reduseres dersom kjøretøy tømmes for hydrogen før de tas inn på verkstedet. Dette vil imidlertid kreve anlegg for tømning, og ha operative konsekvenser for tiden det tar å vedlikeholde et kjøretøy. Dette kan det være utfordrende å kombinere med et driftspausebasert vedlikehold. Jernbanedirektoratet kjenner ikke til at dette gjøres operativt noe sted, og det er usikkerhet knyttet til om dette er teknisk og praktisk gjennomførbart i ordinær drift.

Det er i denne analysen antatt behov for tilpasninger av to eksisterende verksteder på 6000 kvm hver. I disse verkstedene er det i denne analysen lagt til grunn bruk av gassdeteksjonsanlegg og ventilasjon for å sikre at hydrogen ikke blir værende i verkstedlokalene. Videre er det antatt forsterking av bærende konstruksjoner i betong, og etablering av trykkavlastningssystemer i takkonstruksjon for å hindre kollaps av bygningen ved en eksplosjon. Om dette er tilstrekkelige tiltak kan ikke slås fast med sikkerhet før de som er ansvarlige for sikkerheten i verkstedene har gjort sine risikoanalyser. Det er derfor en viss usikkerhet både knyttet til faktisk kostnad for tiltakene, og til omfanget av tiltak som er nødvendig.

### 6.3 Tiltaksbehov i kjøretøyflåten

Overgang til hydrogendrift vil trolig medføre at hele dagens flåte av kjøretøy som trafikkerer de ikke-elektrofiserte strekningene må byttes ut, og at det i tillegg må utvikles og investeres i energivogner. Utsiftingen kan skje gradvis, da dieselskjøretøy og hydrogenskjøretøy kan brukes på de samme strekningene samtidig. Det eneste av kjøretøyene i dagens flåte som eventuelt kan bygges om er motorvognsett type 76 som eies av Norske tog. Type 76 har en energivogn med dieselmotorer som eventuelt kan byttes ut med en hydrogenvogn. Dette er imidlertid vurdert til å være en komplisert og omfattende ombygging med høy prosjektrisiko.

### 6.4 Tekniske løsninger som er lagt til grunn i alternativanalysen

Kapittelet beskriver bruk av hydrogen som energibærer med forutsetninger, antagelser og teknologivalg som er basert på systemer som er tilgjengelige i dag eller i nær fremtid. Det er forutsatt kjøp av hydrogen til markedspris, og at produksjonen av hydrogenet skjer uavhengig av jernbanen.

#### 6.4.1 Kjøretøy med hydrogen som energibærer

I konseptvalgutredningen er det forutsatt hybride kjøretøy, dvs. kjøretøy utstyrt med strømvogter som kan kjøre via kontaktledning, eller med hydrogen. Dette gjør at kjøretøyet kan kjøre på allerede elektrifiserte banestrekninger uten å bruke hydrogen på disse. Ettersom kjøretøyet også er utstyrt med batteri, kan det også utnytte energi fra elektrodynamisk bremsing, såkalt regenerering, og til å jevne ut effektbehovet.

For konseptet er det definert hvilken effekt brenselcellene trenger, eller hvilket volum i hydrogentankene det vil være behov for. Dette vil avhenge av type trafikk, trykk på hydrogen, samt tilgjengelig teknologi på tidspunktet kjøretøy produseres.

Det er i utredningsarbeidet brukt tre kjøretøytyper for alle konseptene: regiontog, fjerntog og godstog.

#### 6.4.2 Personkjøretøy med hydrogen som energibærer

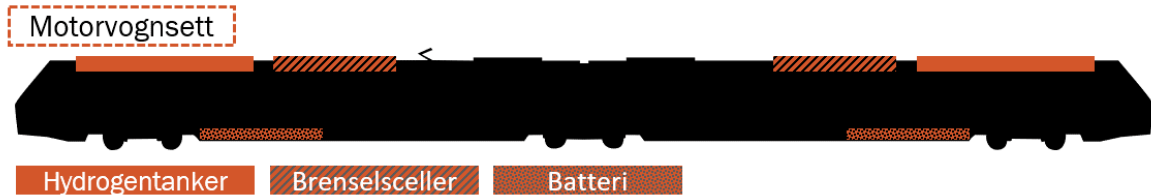
Persontogene med hydrogen som energibærer er i denne vurderingen motorvognsett på 110 og 220 meter. Kjøretøyene er hybride og kan bruke både kontaktledning og hydrogen med brenselceller. Kjøretøyene er utformet slik som vist i Figur 15. Motorvognsettene som driftes med hydrogen i dag er i hovedsak designet for lokal og regional persontrafikk, dvs. kun to vogner. Tre-vogners hydrogenmotorvognsett er under utvikling. Brenselceller og hydrogenbeholdere er vanligvis plassert på taket, mens batteriene er enten på taket eller under gulvet. Det pågår utviklingsprosjekter for å se på løsninger der brenselceller og hydrogentanker plasseres under gulvet eller i maskinrom om bord i motorvogner.<sup>11</sup> I prosjektet er det ikke lagt inn ekstra kjøretøy for å kunne opprettholde rutemodellen i referansealternativet. Behovet for ekstra

<sup>10</sup> [NULLFIB delmål 4](#)

<sup>11</sup> [Vivarail forms hydrogen fuel-cell partnership - International Railway Journal \(railjournal.com\)](#)

motorvognsett avhenger i praksis av tiden det tar å fylle togene med de nødvendige mengdene hydrogen. Den erfaringen fra Tyskland med fylling i drift som er tilgjengelig, gjelder kun korte regiontog.

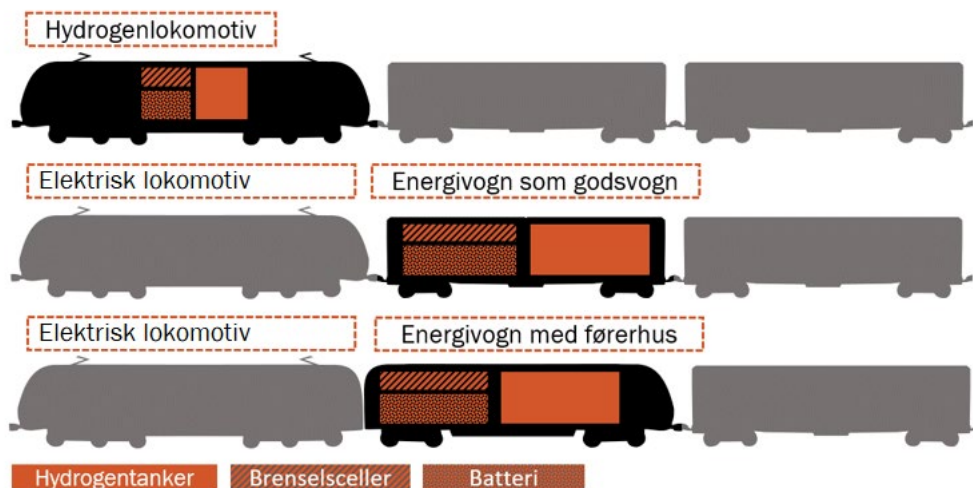
Prosjekter i Italia og Frankrike har basert fremtidig anskaffelse på andre og lengre hydrogen-motorvognsett som er 70-90 meter lange (Coradia Stream, Coradia Polyvalent). I dag er ikke regiontog på 110 m, fjerntog på 220 m, eller hydrogenlokomotiv med 1000 kg H<sub>2</sub> tank tilgjengelig i det europeiske markedet.



Figur 16 Plassering av hydrogentanker, brenselceller og batteri på et hydrogendrevet persontog

### 6.4.3 Godskjøretøy med hydrogen som energibærer

For godstransport vil det enten være aktuelt å benytte et hydrogendrevet lokomotiv med både hydrogentanker, batterier og brenselceller, eller et elektrisk lokomotiv med egne energivogner bak lokomotivet hvor tanker, batterier og brenselceller er plassert. Valgt løsning vil være avhengig av ønsket rekkevidde og derav nødvendig lagringskapasitet. En energivogn vil ha betraktelig større kapasitet sammenlignet med at hydrogeninstallasjonene er innebygget i lokomotivet (hydrogenlokomotiv). Et hydrogenlokomotiv vil være best egnet til person- og lett godstransport, og kan også brukes som skiftelokomotiv. Et elektrisk lokomotiv med energivogn vil være egnet for tung godstransport, men kan også brukes til persontransport, selv om det vil være mer hensiktsmessig med et motorvognsett eller et hydrogenlokomotiv. På lik linje med andre tekniske løsninger med drivstoff, er det i dag ikke tillatt å overføre selve drivstoffet mellom vognene, da dette er en deformasjonssone ved sammenstøt. Energivogner vil derfor produsere elektrisk energi, og overføre dette til lokomotivet hvor det er elektrisk fremdrift.



Figur 17 Forskjellige prinsipper for plassering av tanker, brenselceller og batteri i et hydrogendrevet godstog

Det er forutsatt at hydrogen, for alle kjøretøytyper, lagres som komprimert gass med et trykk på 350 bar ombord i kjøretøyene. Kjøretøytypene har et relativt likt driftsopplegg som dagens tog, med unntak av at det er en noe mer komplisert fyllelogistikk siden fylling er vurdert å ta noe lenger tid. Fylling av hydrogen vil kreve en del skifting som følge av at fylleanleggene i denne analysen er plassert noe avsidesliggende for å kunne ha nødvendig areal, og for å ivareta sikkerhet på en tilfredsstillende måte.



#### 6.4.4 Antall kjøretøy

Følgende tabell beskriver antallet kjøretøy som legges til grunn i hydrogenkonseptet. Det er forutsatt samme behov for kjøretøy i alle konsepter. Det er ikke vurdert avhengigheten til tider for å kunne opprettholde rutemodellen i referansealternativet, rutetabeller og tider som vil medgå til fylling av hydrogen. Kjøretid til/fra fyllestasjon og tiden det tar å fylle, er avgjørende for om det er behov for ekstra kjøretøy. Dette har det ikke vært mulig å utrede.

Tabell 8 Kjøretøy som forutsettes i konsept 2 Hydrogen

Kjøretøytype	Nordlandsbanen	Raumabanen	Røros- og Solørbanen	Samlet
Regiontog hybride hydrogen-el	18	3	8	33
Fjertog hybride hydrogen-el	4	0	0	4
Godstog hybride hydrogen-el	12	2	14	28

#### 6.4.5 Fyllestasjoner for hydrogen

Fyllestasjoner for hydrogen er antatt å levere hydrogen som trykksatt gass med et trykk på 350 bar, men at fylleanleggets lagringstrykk er en del høyere. Fyllestasjonene inkluderer alle komponenter fra tank til dispensermodul, Lagringskapasiteten på hver fyllestasjon er angitt i tabell 7, fyllekapasiteten er på 300 kg/timen, og fyllestasjonene er godkjent med drift helt ned til -40°C.

### 6.5 Teknologisk modenhet og forventet utviklingsløp

I det følgende kapittel blir det summert opp hvordan teknologisk modenhet ser ut generelt for hydrogenteknologi i jernbanen, og hvordan det ser ut for spesifikke kjøretøyskategorier.

#### 6.5.1 Hydrogenteknologi for hydrogenkjøretøy

De siste årene har flere leverandører utviklet konsepter for bruk av hydrogen på jernbanekjøretøy. Det er etablert et pilotprosjekt i Canada for prøving av hydrogenlokomotiv. Hvorvidt dette vil kunne gi spin-off effekter for det europeiske markedet er usikkert. Modenhetsnivået for godslokomotiv er dermed vurdert å være TRL 5.

For transportsektoren vil hydrogen i hovedsak være aktuelt for tyngre veitrafikk, luftfart, skipsfart og jernbane. Jernbane har høye krav til sikkerhet og driftsstabilitet, noe som igjen medfører tidkrevende prosesser for godkjenning, og omfattende krav til dokumentasjon av blant annet sikkerhet og interoperabilitet i Europa. Innføring av ny teknologi vil derfor kunne gå noe langsommere i jernbaneindustrien enn for andre industrier.

Etter hvert som flere delsystemer legges til et kjøretøy, øker den generelle kompleksiteten. Dette gjelder spesielt ved en hydrogendrift med hybride kjøretøy hvor flere drivsystemer må virke sammen for optimal drift. Det gjennomføres mange tester, men det mangler fortsatt mye på erfaring fra drift i krevende miljøer og operasjoner som f.eks. under nordiske klimaforhold.

Teknologien for brenselceller og hydrogentanker brukes i dag i flere ulike typer kjøretøy og industrimaskiner. Det er flere eksempler på jernbanekjøretøy som er utstyrt med hydrogentanker og brenselceller. Det mangler imidlertid erfaring med å bruke teknologien i lengre perioder i et nordisk klima for jernbanekjøretøy.

Før en storskala etablering av hydrogen for jernbanekjøretøy kan etableres, kreves det standarder rettet spesielt mot jernbane. Dette arbeidet er startet av nasjonale og internasjonale standardiseringsorganer, men det er foreløpig få konkrete resultater.

### 6.5.2 Hydrogenteknologi for motorvognsett (persontog)

Motorvognsett med hydrogendrift kan betraktes som modent og tilgjengelige for korte motorvognsett, men mer umodent for lengre persontog eller tyngre godstog.

Det er et økende antall hydrogen to-vogners motorvognsett som blir testet, bestilt og satt i drift i Europa. Men det totale antallet er fortsatt lavt. Modenhetsnivået på disse er vurdert å være TRL 8/9. Dette er noe mindre enn for diesel og elektriske kjøretøy, hvor det finnes utstrakt erfaring med bruk (TRL 9). Det pågår utvikling av tre-vogners dvs. motorvogn, mellomvogn og motorvogn, men disse er ikke godkjent eller levert. Det jobbes med å få godkjent overføring av hydrogengass fra tanker på mellomvogn til motorvogn som har tanker og brenselcelle.

Det finnes ikke lange hydrogen motorvognsett med fire til fem vogner tilsvarende regiontog 110 m med cirka 300 sitteplasser i Europa. Dersom litt kortere motorvognsett på opptil 90 meter kan fungere i regiontogsegmentet (noe som sannsynligvis vil være mulig på de ikke-elektrifiserte banene) så er modenheten i regiontogsegmentet allikevel vurdert å ha et TRL-nivå på 8/9.

Det finnes ikke fjerntog motorvognsett med opptil åtte vogner i Europa. Disse er vurdert å ha et modenhetsnivå på TRL 6. Lengre tog kjøres ofte over lengre distanser og med høyere forbruk per km, så derfor gir tankvolumet stor reduksjon i antall passasjerplasser på 220 meters lengde. Det er dokumentert at nevnte motorvogn regiontog og fjerntog vil gi færre sitteplasser sammenlignet med batteri eller elektrisk. Det er ikke etterspørsel for slike hydrogenkjøretøy i dagens marked og utviklingskostnader må forventes å dekket av den som bestiller.

Her er mulige tekniske løsninger:

- For regiontog 110 m er det en energivogn plassert mellom motorvogner/ styrevogner eller at en eller to motorvogner er dedikert for hydrogentanker, batterier og brenselcelle.
- For lengre motorvognsett tilsvarende fjerntog er det teknisk mulig med hydrogendrift. Løsningen vil da kunne bli lokomotiv i hver ende med hydrogentanker, batterier og brenselcelle, dvs. uten passasjerer. Det er det store energibehovet som tilsier at det ikke blir plass til passasjerer

Det er utført en RFI i denne utredningen for å undersøke hva ulike leverandører av persontog og godstog mener er den teknologiske modenheten i dag og for modenhet i fremtiden. For korte motorvognsett med 2 vogner (tilsvarende regiontog i distriktene) er det bekreftet at dette kan leveres på forespørsel. Det teknologiske modenhetsnivået blir fra én leverandør vurdert til å være 8 i 2023, og 9 i 2027. (Skalaene går fra 1-9 hvor 9 er tilgjengelig og operativt ferdig testet).

På grunn av at driften med hydrogen konverterer hydrogen til elektrisitet, er flere komponenter for drift med kontaktledning allerede på plass i kjøretøyene. En strømvakt, transformator og en likeretter må installeres i kjøretøyene hvis den skal gå på elektrifisert bane. Med energi fra hydrogen, batteri og kontaktledning legges det til et ekstra delsystem som øker kompleksiteten.

Det forventes at etterspørselen etter korte hydrogendrevne motorvognsett vil øke i takt med strengere krav til klimapåvirkning. Dette forventes å skje hovedsakelig der det er lavt passasjergrunnlag og hvor elektrifisering eller delelektrifisering er samfunnsmessig ulønnsom. Det kreves imidlertid at konseptet kan demonstrere at det er sikkert, effektivt, kostnadseffektivt og pålitelig før en overgang fra diesel kan skje i stor skala. Forbedret effektivitet på distribusjonsstadiet vil kunne gjøre konseptet mer kostnadseffektivt i fremtiden.

### 6.5.3 Lokomotiver for gods- og persontrafikken

Det er to mulige løsninger for hydrogendrevne lokomotiver:

- Den ene løsningen innebærer en integrering av hydrogentanker, brenselceller og batterier i selve lokomotivet (hydrogenlokomotivet)
- Den andre innebærer å benytte et elektrisk lokomotiv med en eller to energivogner.

Løsningene er ennå ikke testet i nordisk klima, noe som bidrar til økt usikkerhet. Det er vurdert at modenhetsnivået for godslokomotiv med hydrogen er TRL 5, mens det for energivogn med hydrogen er TRL 6. Det vil si at teknologien er i uttesting og utvikling, men at den ikke er tatt i bruk operativt.

Energivognen vil ha hydrogentanker, batteri og brenselceller og vil mate lokomotivet med elektrisk energi. Utformingen av energivognen kan videre inndeles i to løsninger, med eller uten førerrom. Løsningen uten førerrom vil medføre mer behov for skiftelokomotiver. Den andre løsningen innebærer at energivognen får et førerhus i en ende for å kunne skifte sammen med elektrisk lokomotiv uten bruk av skiftelokomotiv. Dette gjelder også tomtogkjøring frem og tilbake fra hydrogen fyllestasjonen. Det gjenstår en del tekniske utfordringer for lange motorvognsett og lokomotiver, spesielt når det kommer til mengden hydrogen det er nødvendig å bringe med seg.

#### *RFI – Request for information*

Det er gjennomført to forespørsler i markedet (Request For Information; RFI) for å innhente informasjon i denne utredningen, med tanke på å undersøke hva leverandører av persontog, godstog og arbeidsmaskiner mener er den teknologiske modenheten i dag og for fremtiden. Det ble bekreftet at en løsning med hydrogen og brenselceller integrert i lokomotivet og/eller en separat energivogn er teknisk mulig. Det ble også bekreftet at lokomotiver med høyere trekkraft og energilager ikke har kommet like langt i utviklingen som to-vogners persontog. Hvorvidt en energivogn med førerhus vil være tilgjengelig i fremtiden er ikke spesifisert. TRL nivå fra leverandører er vurdert til å være seks per 2023 og åtte i 2030, dvs. en usikkerhet om tilgjengelighet.

#### *Utvikling fremover*

Etterspørselen etter løsninger for store godstog er i dag lavere enn etterspørselen for mindre motorvognsett. Basert på prototyper med ombygde diesellokomotiver er modenheten kommet lengst for mindre lokomotiver og skiftelokomotiver.

For energivogner finnes det eksempler på kjøretøyleverandører som utvikler slike løsninger for det europeiske markedet<sup>12</sup>. Denne løsningen har ikke førerrom i energivogna, og løsningen er et hybrid-kjøretøy med hydrogen-kontaktledningsdrift. Hydrogentanken er vist med en 20 fots container og brenselceller i energivogna, mens lokomotivet er et elektrisk lokomotiv. Ved bruk av hydrogen som komprimert gass vil volum være den begrensende faktoren, og det kan være nødvendig med to energivogner. Flytende hydrogen kan derfor være aktuelt på sikt, men er i dag enda mindre modent for bruk i jernbanekjøretøy enn hydrogen som komprimert gass.

### **6.5.4 Oppsummering**

Teknologimodenhetsnivå for hydrogendrevne kjøretøy er veldig varierende på dette tidspunktet. Modenheten for korte motorvognsett vurderes å være høy nok til å realisere konseptet. For lange motorvognsett cirka 110 m. finnes det i dag ingen produkter på det europeiske markedet som oppfyller TSI krav/TRL nivå, men noe kortere kjøretøy kan vurderes som et alternativ. Fjerntog på 220 m leveres ikke i markedet, og er på tidlig pilotstadium i utviklingen. For godstrafikk er det flere leverandører som oppgir at hydrogendrevne lokomotiver og energivogner testes flere steder, men foreløpig i liten skala. Lokomotivene som er tilgjengelige i dag er lettere typer egnet for å utføre skifting, eller lettere godstransport. For tynge godstog kreves det en energivogn som kobles til lokomotivet. Disse er fortsatt i den tidlige testfasen og er ennå ikke lansert for markedet.

Utredningsarbeidet viser at kostnadene for distribusjon og teknologi for høyere trykk enn 350 bar eller bruk av flytende hydrogen må reduseres før en slik utbygging i stor skala kan synes realistisk. Flytende hydrogen vil bety at kjøretøyet kan transportere mer hydrogen med samme volum, men dette har per i dag et lavt TRL nivå.

## **6.6 Samfunnssikkerhet og tilfredstillelse av lover og forskrifter**

Jernbane er samfunnskritisk infrastruktur som er underlagt særskilte krav til beredskap for å sikre at jernbanetjenester kan leveres i ekstraordinære situasjoner, kriser og krig. I tillegg til de overordnede kravene som gjelder for jernbanen, vil annet lovverk også stille mer konkrete krav til sikkerhet og beredskap for virksomheter som oppbevarer eller håndterer brann- og eksplosjonsfarlige stoffer. Bruk av

---

<sup>12</sup> [From 2025, Nestlé Waters France will use the first hydrogen-powered freight train through an innovative solution developed by Alstom and ENGIE | Alstom](#)

hydrogen som drivstoff i jernbanen må kunne skje i samsvar med gjeldende regler, og eventuelle behov for regelverksendringer må avklares.

Hydrogengass er fargeløs, luktfri og er ikke giftig. Gassen er klassifisert som brannfarlig gass, og antenning av hydrogen i blanding med luft kan føre til eksplosjon. Hydrogen er tennbar i blanding med luft i konsentrasjon fra 4 til 75 % av volumet, og sammenliknet med andre brannfarlige stoffer kreves det svært lav energi for å antenne gassen. For eksempel kan hydrogengass antennes av statisk utladning fra klær og utstyr, eller av statisk elektrisitet som generes av selve utslippet av gassen. Hydrogen er derfor et spesielt vanskelig stoff å håndtere sikkert. Det er alltid en risiko for at noe kan gå galt, så det må antas at enkelte kan vegre seg for enten å jobbe med kjøretøy, eller å reise med tog drevet av hydrogen. For at implementering av hydrogenbasert infrastruktur skal kunne gjennomføres, er det viktig å sikre at både faktisk og opplevd sikkerhet lever opp til de strenge kravene for sikkerhetsnivå man operer med i jernbanen, og til den lave risikoaksept som er knyttet til jernbanevirksomheten. Bruk av hydrogen i jernbanen vil som følge av dette være knyttet til en spesielt stor usikkerhet.

For å avdekke eventuelle regulatoriske barrierer er det gjennomgått relevant nasjonalt og internasjonalt regelverk, i tillegg til offentlig tilgjengelige rapporter og utredninger. Det er sett nærmere på enkelte forhold som underveis i arbeidet har blitt trukket frem som spesielt viktige for jernbanen, slik som tunnelsikkerhet og bruk av strømvagter der kontaktledning allerede er tilgjengelig. Det er også gjort en overordnet vurdering av behovet for hydrogenrelaterte sikkerhetstiltak i eksisterende infrastruktur.

Det er ikke identifisert regulatoriske barrierer for implementering av hydrogen i jernbanen i form av eksplisitte forbud eller etterlevelseregulering som setter krav det er umulig å oppfylle. Det er imidlertid identifisert at den delen av regelverket som setter eksplisitte krav som må oppfylles er lite utviklet for bruk av hydrogen til jernbanemål, og at det må påregnes å komme ytterligere regelverk av denne art som vil gi nye krav som må etterleves. Blant annet gjelder kravene til bruk av hydrokarbongasser i brannstandard for jernbanekjøretøy EN 45545 ikke for hydrogen, og det er per i dag ikke noen alternativ standard knyttet til dette. Dette gir en stor usikkerhet knyttet til gjennomførbarhet for generell bruk av hydrogen som energibærer i jernbanen, og som er spesielt stor for alternativer som baseres på dette. Store deler av regelverket som regulerer bruk av hydrogen er risikobasert, og ikke regelbasert. Dette medfører at det er vanskelig å forutsi om det er regulatoriske barrierer som hindrer ibruktakelse av hydrogen som energibærer i jernbanen før alle aktører med ansvar for sikkerhet knyttet til driften har gjort de nødvendige risikovurderinger av sin konkrete bruk av hydrogen.

To av hovedprinsippene for vurdering av risiko i jernbanen er at endringer som risikovurderes ikke skal øke risikonivået, og at enhver unødig risiko skal unngås. Bruk av hydrogen endrer på en del grunnleggende risikoforhold i jernbanedriften på en måte som vil være utfordrende for aktørene. Det vil være utfordrende å argumentere for at hydrogendrift ikke vil øke risikonivået sammenlignet med løsningen det endres fra. Det vil for å kunne vurdere at slike risikoøkninger ikke kan unngås også være utfordrende å dokumentere at det ikke finnes andre måter å løse dette på enn å ta i bruk hydrogen som energibærer, så lenge det finnes andre alternativer som ikke medfører de samme endringene i grunnleggende risikoforhold.

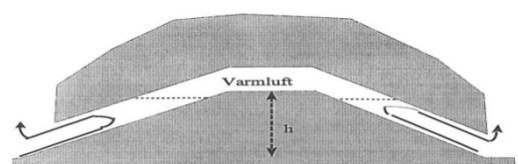
### Tunnelsikkerhet

Det generelle regelverket knyttet til tunnelsikkerhet er beskrevet i kapittel 8.6.4 Tilfredsstillelse av lover og forskrifter.

Tunnelsikkerhet spesielt knyttet til hydrogendrift er et krevende tema, da den eneste kjente sikkerhetsstrategien for håndtering av avvik i hydrogensystemet er å slippe ut hydrogen kontrollert gjennom en trykkavlastingsmekanisme. Dette er en sikkerhetsstrategi som kan fungere for et tog på en åpen linje, der hydrogen kan tynnes ut eller brenne på oversiden av kjøretøyet, men som gir utfordringer dersom kjøretøyet er i et innelukket område som f.eks. i en tunnel. De mest alvorlige konsekvensene fra et innendørs hydrogenutslipp er en kraftig eksplosjon og en etterfølgende brann som sprer seg.

Det er spesielt to forhold som er avgjørende for eksplosjonsfare i tunneler som følge av lekkasje.

Jernbanetunneler er ofte konstruert med høybrekk, noe som gjør at det ikke blir gjennomtrekk av luft gjennom tunnelen. Ved en hydrogenlekkasje vil lettantennelig gass kunne samles i toppen av tunnelen. For å unngå eksplosjonsfare i slike tunneler må det iverksettes særskilte tiltak.



I tunneler med stigning uten høybrekk vil luftstrømmen gi en pipeeffekt, noe som vil gjøre at hydrogengassen luftes ut, og at faren for eksplosjon blir lav. Avhengig av utluftingseffekten i slike tunneler, men også i horisontale tunneler, må det gjøres en undersøkelse av behovet for særskilte tiltak. For korte tunneler må det gjøres en vurdering av om oppsamling av hydrogengass vil medføre en risiko for eksplosjon.

Det er fastsatte brannkrav til utforming av tunneler, men det er ikke spesifikke krav knyttet til eksplosjonsfare. Nyere forskning viser at tunneler har større evne til å tåle trykkløper som følge av eksplosjon enn til å tåle høy varme fra langvarig brann<sup>13</sup>.

Jernbanedirektoratet er ikke kjent med at det er gjort konkrete vurderinger av hendelser som kombinerer f.eks. en jet-brann fra et kjøretøys trykkavlastingssystem med f.eks. tunneler isolert med PE skum. Dette er bare ett eksempel på en rekke svært detaljerte og komplekse problemstillinger som knyttes til den konkrete bruken av hydrogen i faktiske aktiviteter og fysiske lokasjoner. Slike problemstillinger må risikovurderes av både infrastrukturforvalter, operatør, fylleanleggseier/drifter, verkstedeier/vedlikeholdsoperatør og godtas av offentlige myndigheter som Statens jernbanetilsyn, kommuner, og/eller Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap, før det kan slås fast at bruk av hydrogen som energibærer i jernbanen er gjennomførbart.

Jernbanedirektoratets vurdering er at det er risiko for at noen av disse vurderingene ikke konkluderer med at det er sikkerhetsmessig forsvarlig å ta hydrogen i bruk ut ifra de akseptkriterier som gjelder. Dette gir en usikkerhet både i forhold til forventningen om tiltaksbehov og til gjennomførbarhet for alternativet.

### **6.6.1 Transport av hydrogen på jernbane**

Transport av komprimert hydrogen er regulert av det internasjonale regelverket RID, som er implementert i norsk rett ved forskrift om landtransport av farlig gods med vedlegg. Komprimert hydrogen er klassifisert som et farlig stoff (klasse 2, 1F) i henhold til ADR/RID- regelverket for landtransport av farlig gods.

RID legger ikke begrensning på maksimalt tillatt transportert mengde, og det er ikke restriksjoner på transport av komprimert hydrogen i jernbanetunneler.

### **6.6.2 Fyllestasjoner for hydrogen**

For planlegging og bygging av anlegg for oppbevaring/lagring og fylling av hydrogen vil man i hovedsak følge plan- og bygningslovens ordinære regler om planavklaring, konsekvensutredning, ROS-analyse og byggetillatelse osv., men det er også i en del tilfeller behov for tillatelse fra Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap. Disse reglene sikrer at anlegg lokaliseres og utformes slik at hensyn til samfunnssikkerhet og beredskap ivaretas, og at relevante forskrifter følges.

En sentral utfordring knyttet til planlegging av nye anlegg er at store deler av regelverket er risikobasert. Det oppleves derfor å være lite forutsigbarhet knyttet til konkrete sikkerhetskrav som påvirker lokaliseringmuligheter og arealbehov. Dette gjelder spesielt med hensyn til behovet for sikkerhetsavstander, ettersom dette i henhold til dagens regelverk beregnes med utgangspunkt i *restrisikoen* som gjenstår etter at alle hensiktsmessige sikkerhetstiltak er innarbeidet, noe som i praksis ikke er mulig i idfase/konseptfase. Ettersom man både nasjonalt og internasjonalt har begrenset erfaring fra etablering av nye anlegg, har man også hatt svakt grunnlag for å estimere behovet for sikkerhetsavstander i tidligfase, og for å vurdere om en aktuell lokalitet eller et konsept er egnet eller ikke. Dette gjør at prosjektrisikoen i tidligfase oppleves som høyere enn for andre alternativ.

For mobile og midlertidige løsninger vil behovet for tillatelse etter plan- og bygningsloven eller annet lovverk måtte vurderes i det enkelte tilfelle. Forhold knyttet til risiko og sårbarhet må vurderes kvalitativt i det enkelte tilfelle av de aktørene som har ansvaret for sikkerheten ved anlegget.

Drift av anlegg er omfattet av flere forskrifter, avhengig av anleggets størrelse og utforming. Behovet for særskilte driftstillatelser må vurderes for hvert enkelt tilfelle. For anlegg som har kapasitet til å lagre mer enn fem tonn hydrogen vil det etter forskrift om håndtering av farlig stoff, måtte innhentes samtykke fra Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB) før bygging kan iverksettes.

---

<sup>13</sup> HyTunnel-CS: Deliverable D4.4 Results of the deferred experimental programme and associated activities

Hvorvidt det er aktuelt å etablere fyllestasjoner eller fyllesoner inne på terminalområder, i nærheten av annen virksomhet eller tett bebyggelse må vurderes i det enkelte tilfelle.

Samfunnssikkerhet omfatter også sikring mot handlinger som gjøres med vilje. For å vurdere sikkerhetskrav til et fylleanlegg må aktørens hensikter og kapasiteter vurderes. Det er hovedsakelig terror og sabotasjeaktører som gjør et fylleanlegg for hydrogen sårbart, som følge av at det har betydning for samfunnssikkerheten at jernbanen holdes i drift og at jernbanen lett gis stor oppmerksomhet. Når dette kombineres med muligheter for eksepsjonelle hendelser som en større eksplosjon eller vanskelig brann, kan dette være et attraktivt mål for aktører som er ute etter oppmerksomhet, skape frykt eller hindre drift på jernbanen. Fare knyttet til terror eller sabotasje vil kreve at det må utføres sikringstiltak på en måte som gjør at aktørene ikke anser det som et lett mål. Håndtering av dette vil sette krav til fysisk sikring og lokalisering av anlegg, noe som ikke nødvendigvis bidrar til effektiv bruk av anlegget. Det er imidlertid svært usikkert hva som vil kreves for å oppnå en tilfredsstillende sikring, da dette er noe som må vurderes i hvert enkelt tilfelle.

Det stilles det svært strenge krav til godkjenning av utstyr for produksjon, oppbevaring og bruk av hydrogen<sup>14</sup>. Samfunnssikkerhet (3R-vurdering)

3R-metoden er en metodikk for å vurdere hvordan transportforpliktelser og fremkommelighet ivaretas i forhold til robusthet, redundans og restitusjon.

- **Robusthet:** Transportsektorens kapasitet til å tåle ekstraordinære belastninger mht. naturhendelser, ulykker og tilsiktede handlinger.
- **Redundans:** Transportsystemets eller -sektorens muligheter til å ivareta transportforpliktelsene, ved omdirigering eller ved bruk av annet transportsystem.
- **Restitusjon** handler om hvor raskt det er mulig å gjenopprette transportsystemets kapasitet.

For banetransport har Jernbanedirektoratet i en evaluering av metoden gjort to presiseringer:

- Transportforpliktelsene er i forhold til passasjerer og gods
- Skader på passasjerer og gods kan dekkes innenfor robusthet, og da mht. storulykke- og katastrofepotensiale (samfunnssikkerhet)

#### *Vurdering av robusthet*

Konseptet vurderes å påvirke jernbanens robusthet. Det introduseres i forhold til ulykker en ny risiko for storulykker knyttet til fylleanlegg. Det introduseres endrede risikoforhold knyttet til brann, og det introduseres det som bør vurderes som en ny risiko knyttet til eksplosjonsfare. Det introduseres i tillegg endrede risikoforhold knyttet til konsekvenser av naturhendelser som følge av at hydrogen har andre branntekniske egenskaper enn diesel. I forhold til robusthet mot tilsiktede handlinger endres ikke forholdene knyttet til selve togdriften seg så mye, men introduksjonen av hydrogenfylleanlegg medfører endrede risikoforhold da dette er et potensielt attraktivt objekt for tilsiktede handlinger. Konseptet introduserer videre en tett knytting mellom hydrogenlogistikken og robustheten. Denne er vurdert å ha en lavere robusthet enn diesellogistikken da antatt lagret energimengde i fylleanleggene er betydelig lavere enn i dagens fylleanlegg for diesel.

#### *Vurdering av redundans*

Sammenlignet med 0-alternativet innebærer konseptet ikke en vesentlig endring av jernbanens muligheter til å ivareta transportforpliktelsene ved omdirigering. Togene vil være hybride, og kan dermed i teorien benyttes på alle banestrekninger i Norge, samt elektrifiserte strekninger i Sverige. Togene forutsettes å ha tilstrekkelig energi om bord til å kunne håndtere påregnelige omkjøringsstrekninger. Bruk av energivogner gir i prinsippet også mulighet til å benytte ordinære elektriske lokomotiv på ikke-elektrifiserte strekninger.

#### *Vurdering av restitusjon*

Sammenlignet med 0-alternativet vurderes konseptets restitusjonsevne etter skader på infrastruktur å være dårligere. Årsaken er at fylleanleggene er betydelig mer komplekse, avanserte, opererer på høyere trykk og har høyere krav til sikkerhet som følge av hydrogen sine branntekniske egenskaper. Det kreves derfor mer for å sette jernbanen i drift igjen etter en uønsket hendelse.

---

<sup>14</sup> CFD Study to Assess Safety Aspects of TPRD Releases from Heavy-duty Hydrogen Vehicles and Trains in Tunnels

## 6.7 Konsekvenser for togtrafikken

For å vurdere konsekvenser for togtrafikken belyses i det følgende kapitlet ulike forhold der rutiner eller tidsbruk i konseptet skiller seg fra referansekonseptet.

### 6.7.1 Tanking

Jernbanekjøretøyene er lange og kan inneholde flere lagringstanker som må fylles. Dette kan være tidkrevende dersom flere tanker skal fylles uten at infrastrukturen er tilrettelagt for dette. Enten må fyllestasjonen tilpasses med fyllepunkter til alle kjøretøyets tanker, eller så må kjøretøyet flyttes flere ganger i løpet av fylleoperasjonen. Avhengig av teknologivalg kan påfyllingstider for hydrogen være langsommere enn for diesel. Valg av fylleteknologi og tilrettelegging av fyllestasjonen for å unngå kø for kjøretøy må derfor vurderes for hver fyllestasjon.

Økt sikkerhet rundt fyllestasjon for hydrogen kan medføre ytterligere økt tidsbruk ved påfylling av hydrogen sammenlignet med sikkerhetsnivået på dagens dieselpåfylling.

Det er fortsatt en usikkerhet tilknyttet påfyllingstid for hydrogen, så magasineringskapasitet for kjøretøy som venter på å fylles må vurderes nærmere for de ulike plasseringene dersom konseptet vurderes videre.

### 6.7.2 Driftsopplegg

For lette persontog med hydrogen som energibærer vil ikke kapasitet til å kjøre lange strekninger være en barriere som er til hinder for bruk av teknologien. De lengste persontogstrekningene, som fjerntogene på Nordlandsbanen, er mer utfordrende, og det er noe usikkerhet knyttet til tilgjengeligheten for slike kjøretøy. Disse togene er beregnet å bruke 333 kg hydrogen per avgang (per retning). Det er forutsatt at kjøretøyene kan fylle drivstoff i begge ender av pendelen, og at det er mulig å utstyre kjøretøyene med tilstrekkelig tankkapasitet for strekingen, samt nødvendige reserver. Et hydrogendrevet togsett for fjerntrafikk vil derfor få lavere passasjerkapasitet enn tilsvarende tog drevet med elektrisitet eller diesel. Tilsvarende vil et godslokomotiv med hydrogen på samme strekning ha behov for å frakte 858 kg hydrogen.

Det er teoretisk mulig å lagre energimengder om bord i et kjøretøy for persontrafikk med hydrogen som energibærer, og som gir kjørelengder som er sammenlignbare med hva vi per i dag har på dieseldrevne kjøretøy, men det vil altså ha konsekvenser for passasjerkapasiteten i kjøretøyene.

Det som skiller driftsoppleggene for et hydrogendrevet og et dieseldrevet godstog er fremfor alt tanking, skifting og hydrogenmengder som er nødvendige. Et hydrogendrevet lokomotiv og et lokomotiv med energivogn med førerhus har et lignende driftsopplegg som dagens dieseldrevne kjøretøy. Skifting kan utføres uten at lokomotivet trenger å snu retning under vognskifting eller tanking. Det er i utredningen forutsatt at energivognen(e) vil ha eget førerhus i motsatt ende av lokomotivet, slik at lokomotiv og energivogner til sammen fungerer som én enhet. Det er imidlertid ikke funnet dokumentasjon på at det finnes, eller er under utvikling energivogn med førerrom i den ene enden.

Dersom energivognen som er koblet til lokomotivet ikke har eget førerhus, øker kompleksiteten betydelig. Det vil bety at lokomotivet og energivognen må endre retning ved skifting og tanking, noe som vil medføre lengre omløpstider og behov for ytterligere spor og skiftebevegelser.

### 6.7.3 Robusthet i rutemodell og omløpstid

Valg av strategi for tanking vil ha en vesentlig rolle for konseptet. Det tar generelt noe lengre tid å fylle hydrogen enn diesel, noe som kan innvirke negativt på togpendler med kort vendetid. Det er vurdert at alle regiontoglinjene, som er de avgangene med kortest vendetider, vil ha tilstrekkelig energilagringsskapasitet om bord for hele driftsdøgnet. Fylling av hydrogen vil dermed ikke påvirke omløpstiden, men kan medføre behov for noe mer bemanning til fylling av hydrogen i løpet av natten, fordi hvert enkelt togsett antas å kreve litt mer påfyllingstid enn diesel.

For godstog som krever store mengder hydrogen er det flere mulige strategier avhengig av driftsopplegg og lokomotivtype. Den tekniske løsningen som er forutsatt i KVVU-en er at godsavgangene med størst energibehov vil trekkes av et lok med to tilhørende energivogner. Denne løsningen kan kreve ekstra tid til tanking for godstogene, sammenlignet med i dag. Materieellturneringsplaner for godslinjene har ikke vært

tilgjengelig for prosjektet, og det er dermed ikke gjennomført detaljerte vurderinger av dette. Det ventes at dette primært kan være en utfordring for kombigodstrafikken, som har en relativt høy utnyttelse av sin kjøretøyflate. Tømmertrafikken har en mye lavere utnyttelse av sin kjøretøyflate, og noe økt tid til tanking vil trolig ikke være en utfordring for denne togkategorien.

En alternativ løsning til det å sette inn én eller to energivogner, kan være å heller stoppe for å fylle hydrogen underveis på de lengste og mest energikrevende linjene. Hydrogen som energibærer på jernbanen er under utvikling, og avhengig av den teknologiske utviklingen i hastigheter i energioverføring (fyllehastighet, utskifting av hydrogentank, e.l.) vs. plasseffektiv oppbevaring av hydrogenet, kan den foretrukne løsningen også endre seg. En slik løsning kan medføre noe økning i framføringstid. Det presiseres at det er løsningen med energivogner som er lagt til grunn for kostnader og andre vurderinger i utredningen, da dette framstår som den mest hensiktsmessige løsningen på grunnlag av foreliggende informasjon.

Konseptets robusthet ventes å være lavere enn i referansealternativet, ettersom godskjøretøyenes trafikale egenskaper knyttet til vending og tanking endres og rutemodellen forutsettes uendret. Dette kan imidlertid kompenseres ved bruk av flere kjøretøy for å gjennomføre den samme driften.

#### **6.7.4 Endring i togframføringstid**

Kjøretiden er sterkt avhengig av kjøretøyenes effekt. En vesentlig forskjell mellom elektrisk drift og dieseldrift som i referansealternativet, er nettopp kjøretøyenes effekt, og dermed også kjøretid. Som en del av simuleringene utført i forbindelse med vurdering av konseptene, er det også gjort en vurdering av kjøretid. I simuleringene er det lagt til grunn at kjøretøy på ikke-elektrifiserte strekninger som drives av hydrogen har samme effekt som dieseldrevne kjøretøy. Kjøretøy som kjører på elektrifiserte strekninger har høyere effekt, og dermed også kortere kjøretid. Basert på simuleringene er det funnet at kjøretidene i hydrogenkonseptet er de samme som for dieselkonseptet. Dette skyldes at vekt og trekkdiagrammer er de samme for begge konseptene.

### **6.8 Mulig tidsplan for innføring av alternativet**

Hydrogenteknologi som energikilde for jernbanekjøretøy har i løpet av de siste årene opplevd en modning, og har blitt anerkjent som et mulig miljøvennlig og bærekraftig alternativ til diesel. Gjennom konvertering av hydrogen til elektrisitet via brenselceller kan denne teknologien være i stand til å bidra til nullutslipp på jernbanen.

Selv om det allerede er gjennomført vellykkede tester av hydrogendrevne tog i flere land, både i og utenfor Europa, er det imidlertid flere utfordringer som må håndteres før denne teknologien kan bli en integrert del av jernbanetransportinfrastrukturen. En vesentlig utfordring vil være å etablere en egnet infrastruktur for produksjon, transport og lagring av hydrogen på en effektiv og trygg måte.

#### **6.8.1 Beslutningsprosess**

Proessen fram til en beslutning om investering i infrastrukturen og anskaffelse av kjøretøy med ny energibærer foreligger, består av flere ledd. Med hensyn til å realisere effekter på klimagassutslippene fra norsk jernbane innen 2030, er det en forutsetning at beslutningen tas og følges opp med budsjettmidler for gjennomføring relativt raskt.

Etter at utredningen er ferdigstilt, vil det gjennomføres en ekstern kvalitetssikring (KS1), som vil legge grunnlaget for en beslutning i regjeringen. Dette kan skje samtidig med at regjeringen legger fram sitt forslag til Nasjonal transportplan, og Stortinget behandler denne. Dette forventes i medio 2024. Deretter vil det kunne bevilges midler til forprosjektfasen av prosjektet, inkludert utforming av hovedplan og detaljplan. Disse skal i sin tur gjennom en ny ekstern kvalitetssikring (KS2), før en investeringsbeslutning kan tas, anslagsvis tidligst i 2028.

#### **6.8.2 Planlegging**

For å benytte hydrogen som energibærer på jernbanen, er det primære tiltaket i infrastrukturen å planlegge og bygge fyllestasjoner for hydrogen.



Før det kan bygges må det foreligge teknisk hovedplan, teknisk detaljplan, samt en godkjent reguleringsplan. Teknisk hovedplan utarbeides gjerne parallelt med kommunedelplan, mens en teknisk detaljplan utarbeides parallelt med detaljregulering.

I planleggingen ventes det at det som vil være mest tidkrevende er avklaring av tilgang til, og regulering av relevante arealer. Særlig dersom tilgjengelige arealer som er avsatt til jernbaneformål ikke er tilstrekkelige for fyllestasjonene, inkludert tilkomst for lastebiler som skal fylle over hydrogenet. Regelverket for bruk av hydrogen er ikke endelig avklart, og det å få avklart hvilke forutsetninger som skal legges til grunn for hydrogenfyllestasjoner på jernbanen vil være svært viktig. Dersom områder må omreguleres kan det antas å ta 1-4 år å planlegge og regulere arealer til fyllestasjoner, avhengig av om stasjonen kan bygges på eksisterende jernbaneområder, eller om nye arealer må finnes og omreguleres.

### **6.8.3 Bygging**

Når plangrunnlag og reguleringer er ferdig avklart, inkludert eventuelle behov for oppkjøp av eiendom, kan selve byggingen av fyllestasjonene starte. Selve tankanlegget kjøpes, og konstruksjonsarbeidet består av grunnarbeider for anlegget, adkomst for lastebiler, adkomst med spor for tog, samt sikkerhetstiltak som må etableres. Dette anslås å ta 2-3 år.

### **6.8.4 Anskaffelse av kjøretøy**

For persontrafikken avhenger anskaffelsestiden primært av om kjøretøyene kan anskaffes gjennom en opsjon i eksisterende avtale med en kjøretøyleverandør, eller om en slik avtale først må inngås. Selve inngåelsen av en slik avtale kan forventes å ta 3-4 år for kjøretøy med nye energibærere, og selve spesifikasjonen, produksjonen og leveransen av kjøretøyene tar ca. 3-6 år, bl.a. avhengig av hvor moden teknologien som tas i bruk er. Generelt sett tar mindre moden teknologi lengre tid å anskaffe, produsere og testkjøre.

#### *Regiontog*

Nye hydrogendrevne regiontog vil ta 3-5 år å anskaffe dersom de kan anskaffes som del av en eksisterende avtale. En mulighet kan være å inkludere nye energibærere i en framtidig avtale for anskaffelse av nye regiontog til Østlandet. Dersom det må etableres en egen avtale med kjøretøyprodusent for formålet, vil det ta om lag 7-10 år å anskaffe nye regiontog. Eksisterende kjøretøy i markedet er i større grad tilpasset korte linjer, og anskaffelsestiden vil påvirkes av om det kan kjøpes kjøretøy som allerede er utviklet, eller om kravspesifikasjonen innebærer at kjøretøyprodusentene utvikler nye kjøretøytyper.

De dieseldrevne regiontogene, type 93, oppnår forventet levealder i 2030-32, og må erstattes. Planlegging av denne anskaffelsen avventer anbefaling og beslutning om framtidig energibærer på de ikke-elektrifiserte strekningene.

De bimodale (diesel-kontaktledning) regiontogene, type 76, har forventet levetid fram til ca. 2051. Hva som skjer med disse ved overgangen til en ny energibærer må vurderes nærmere. Ved overgang til hydrogen kan de fortsatt brukes som de er med diesel eller bygges om, avhengig av hva en kost-nytte-vurdering viser er mest hensiktsmessig.

#### *Fjerntog*

Norske togs avtale med Stadler om nye fjerntog kan benyttes for å anskaffe nye fjerntog med kontaktledning eller kontaktledning/batteri som energibærere, men innehar ikke opsjoner for hydrogen. For anskaffelse av nye fjerntog med hydrogen som primære energibærere vil det måtte etableres en egen avtale, og anskaffelsen anslås å ta 7-10 år fra en beslutning er tatt.

#### *Godstog*

For godslokomotiver er anskaffelsesprosessen ofte raskere enn for kjøretøy til persontrafikken, spesielt for aktører som ikke er underlagt offentlig anskaffelsesregelverk. Godstogoperatørene avgjør i større selv hvor omfattende eller enkelt de utformer anskaffelsesprosessen, og det er mindre behov for spesialtilpasning til transportoppgaven enn på persontog (hvor det skal bestemmes setekonfigurasjon, ombordfasiliteter osv.). Selve avtaleinngåelsen tar om lag 0,5-1 år.

Ettersom batteri- og hydrogenlokomotiver, fremdeles er en relativt umoden teknologi, ventes det å ta lengre tid å få levert slike lokomotiver enn andre typer. I denne utredningsfasen er det for hydrogen- og batterilokomotiver antatt at drivkraften vil bestå av et elektrisk lokomotiv som forsynes med energi fra strømvogter (der det er kontaktledning) og en etterhengt energivogn med hhv. hydrogentank, brenselceller og batteri eller kun batteri. På noen linjer er det aktuelt med to energivogner i hydrogenkonseptet. Totalt anslås det å ta ca. 5-9 år å anskaffe godslokomotiv og/eller energivogn med hydrogen, avhengig av bl.a. hvor mye innovasjon og utvikling som er nødvendig. Hvor lang tid det tar avhenger imidlertid også av når anskaffelsen planlegges gjennomført (ettersom teknologien er i utvikling og modning), og om anskaffelsen er det første lokomotiv pluss energivogn som skal leveres av en gitt type.

Med opplysningene over er det sannsynlig å kunne forvente en gradvis innfasing av hydrogen fra ca. 2035-2038 frem mot at levetiden til eksisterende diesel/kontaktledning- kjøretøy etter hvert går ut.

## 6.9 Kostnader

Konseptet Hydrogen, med tilhørende fyllestasjoner, innebærer investeringer i både infrastruktur og kjøretøy. Overordnet består investeringene i infrastrukturen av følgende elementer:

- Fyllestasjoner for hydrogen med nødvendige tilpasninger og infrastruktur
- Verksted- og beredskapstiltak
- Eventuelle nye sidespor for oppstalling under tanking
- Eventuelle sikkerhetstiltak i tunell. Disse er i denne analysen vurdert til å ikke være nødvendige og er derfor satt til null, men bidrar samtidig til en vesentlig del av usikkerheten ved alternativet.

I det følgende beskrives hovedmomentene i hvilke investerings- og vedlikeholdstiltak som forutsettes i dette konseptet. Det henvises til underlagsrapporten "Notat arealbeslag og kostnader for hydrogendepot" for nærmere detaljer om metoder og byggeklosser som er benyttet i beregningen av kostnader.

Tabellen nedenfor beskriver kostnadene til investering i infrastrukturen, fordelt på type element og bane. Fem store hydrogendepoter har lokalproduksjon av hydrogen inkludert i kostnaden. Dette gjelder Bodø, Trondheim, Kongsvinger, Hamar og Støren. De fire minste hydrogendepotene får hydrogen levert via tankbil. Dette gjelder Mo i Rana, Alnabru, Steinkjer og Dombås.

Tabell 9 Investeringskostnader i infrastrukturen i alternativ 2a Hydrogen i millioner kroner.

Infrastrukturelement	Nordlandsbanen	Raumabanen	Røros- og Solørbanen
Hydrogen fyllstasjon (Del av hydrogendepot)	984	83	667
Jernbanetekniske (Del av hydrogendepot)	843	77	548
Verksted-, sikkerhets- og beredskapstiltak	968	276	266
<b>Sum</b>	<b>2 795</b>	<b>437</b>	<b>1 480</b>

Sikkerhetstiltak i tunneler med høybrekk, og evt. tunneler med stigning og horisontale kan innebære kostnader. Dette krever en grundig gjennomgang av tunnelene for banestrekningene der hydrogendrift benyttes, og det er satt av en rund sum på 0,5 mrd. pluss prosjektkostnader for å håndtere dette. Dette inngår i summen for Verksted-, sikkerhets og beredskapstiltak.

Tabellen nedenfor viser forventede vedlikeholdskostnader for infrastrukturen.

Tabell 10 Vedlikeholdskostnader for infrastrukturen i alternativ 2a Hydrogen

Vedlikeholdskostnader for infrastruktur	Nordlandsbanen	Raumabanen	Røros- og Solørbanen
Sum vedlikeholdskostnader (mill. kr. per år)	15,2	3,0	9,1

Det er forutsatt samme kjøretøyflåte i alle konsepter, med ulik energibærer:

- Regiontog, ca. 110 m lange motorvognsett. Omfatter også regiontog i distrikt, som sannsynligvis vil være kortere enn regiontog til bruk i byområdene.
- Fjertog, 220 meter lange motorvognsett.
- Godslokomotiv, 6-akslet.

Kjøretøyene vil ha ulike anskaffelseskostnader, avhengig av hvilken energibærer som benyttes. Hydrogendrevne kjøretøy er ikke et fullt utviklet produkt og har dermed usikkerhet knyttet til anskaffelseskostnad, men antas å være dyrere enn dagens dieseldrevne tog.

Tabell 11 Investeringskostnader til kjøretøy som forutsettes i alternativ 2a Hydrogen, mill. kroner

Kjøretøytype	Per kjøretøy	Nordlandsbanen	Raumabanen	Røros- og Solørbanen
Regiontog	288	5 184	864	2 304
Fjertog	941	3 762	0	0
Godstog	238	2 859	477	3 336
<b>Sum per bane</b>		<b>11 806</b>	<b>1 341</b>	<b>5 640</b>

Tabell 12 Batterikostnader for kjøretøy (sum per togkategori per bane) i millioner kr/år for alternativ 2a Hydrogen

Kjøretøytype	Nordlandsbanen	Raumabanen	Røros- og Solørbanen
Regiontog	4,3	0,7	1,9
Fjertog	1,4	0,0	0,0
Godstog	5,7	1,0	6,7
<b>Sum</b>	<b>11,4</b>	<b>1,7</b>	<b>8,6</b>

Det er stor usikkerhet knyttet til prisen for hydrogen. Det er stort spenn i prisene som er blitt opplyst fra leverandører og brukere av hydrogen. Dette spenner fra 120 kr/kg til under 50 kr/kg. Prisen for grønt hydrogen er tett knyttet til kraftprisen og anleggstørrelsen. Med det konseptet som er valgt å regne på, med tilkjørt hydrogen i gassform, er prisen også følsom overfor transportkostnader som avstand mellom produksjonsanlegg og fyllestasjon.

For konseptvalgutredningen er det lagt til grunn bruk av grønt hydrogen til en pris på 59 NOK/kg, ferdig levert på togets tank. Dette er igjen basert på en energipris på 55 øre per kWt levert til hydrogenproduksjonen. Dette tilsvarer en energipris på 180 øre per kWh ved bruk av hydrogen.

## 6.10 Oppnåelse av effektmål

### 6.10.1 Reduserte klimagassutslipp innen 2030

Hvorvidt det er mulig å oppnå reduserte klimagassutslipp innen 2030 avhenger i stor grad av hvilke forutsetninger som blir satt for beslutning, planlegging og gjennomføring av konseptet. For konseptet hydrogen forventes det å ta lang tid å anskaffe kjøretøy, og det blir sett på som urealistisk med en full innføring før 2030.

Det er allikevel mulig å gjennomføre pilotprosjekter, og private aktører som leier eller har mer effektive beslutnings- og anskaffelsesprosesser vil kunne anskaffe kjøretøy slik at det vil være mulig å kunne overføre noe trafikk til en ny energibærer. Det vil derfor kunne være potensiale for å oppnå noe redusert klimagassutslipp i forhold til dagens dieseldrift innen 2030 – gitt en rask beslutningsprosess.

### 6.10.2 Reduserte klimagassutslipp innen 2050

Alternativet reduserer klimagassutslippet fra persontog og godstog ned mot null, sammenlignet med en videreføring av dagens diedseldrift.

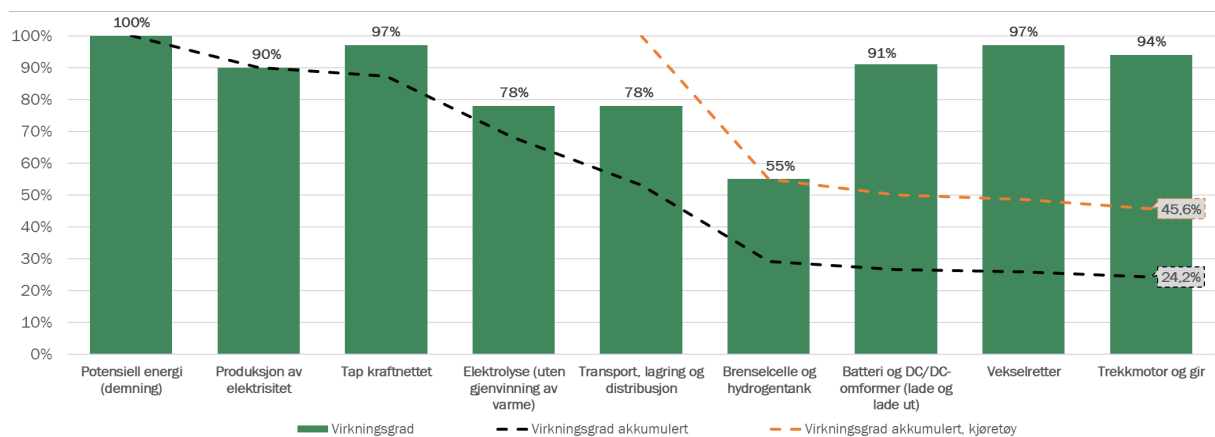
Som vist i vedlegg klimagassutslipp og Tabell 60 vil alternativet for hydrogen ha et totalt klimagassutslipp på 277 355 tonn CO<sub>2</sub>-ekv. over en periode på 75 år, hvor største delen av utslippet er knyttet til indirekte utslipp i driftsfasen, som da omfatter utskiftning av teknisk utstyr slik som batterier og brenselceller. Alternativet vil være klimanøytralt etter 0,4 år i drift. Alternativet er vurdert å kunne settes i drift i ca. 2035.

### 6.10.3 Energieffektivitet

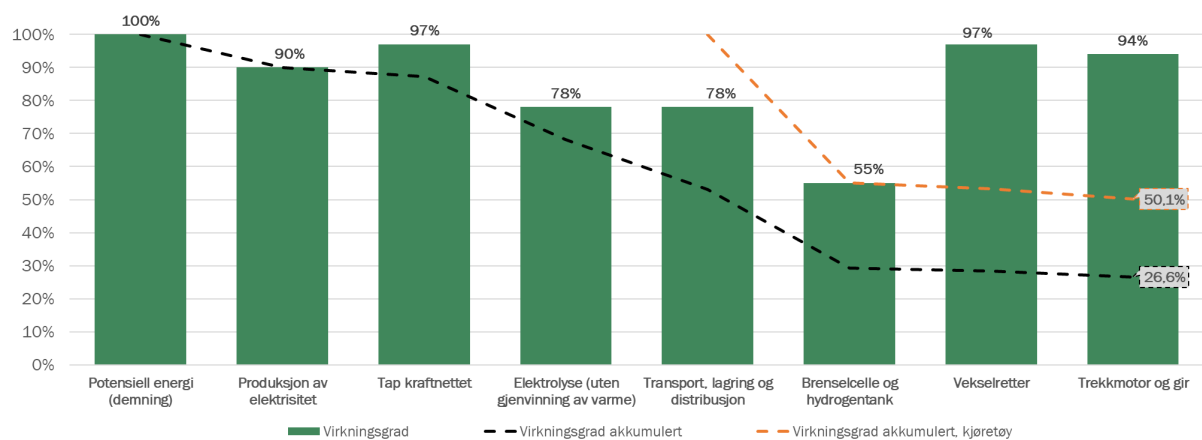
#### Energieffektivitet fra «Well To Wheel»

Batteripakken i et hydrogendrevet tog tar imot lading ved retardasjon, kan utnytte energien i batteriet og dermed redusere hydrogenforbruket. Batteripakken vil også kunne lades under kjøring på strekninger med kontaktledning.

Energieffektiviteten for hydrogen «Tank-To-Wheel» er beregnet til 50 % om det regnes en direkte strøm fra hydrogentank til hjul, mens for hele kjeden havner energieffektiviteten på 24 % (27 % om energien kanaliseres direkte til fremdrift, utenom batteriene). Energieffektiviteten kan imidlertid bli høyere om man utnytter spillvarme og oksygen fra elektrolyseprosessen. Totalt sett kan man i så fall regne med 30-35 %. Dette betinger imidlertid at produksjonen foregår geografisk lokalisert et sted hvor det finnes slik etterspørsel.



Figur 18 Virkningsgrad –Hydrogenkjøretøy (hele kjeden «well-to-wheel»), forutsetter at all energi går gjennom batteriene



Figur 19 Virkningsgrad –Hydrogenkjøretøy (hele kjeden «well-to-wheel»), forutsetter at all energi går utenom batteriene.

#### **6.10.4 Forbruk av knappe ressurser**

Dette alternativet benytter elektrisitet som energikilde til utvinning av hydrogen. Det norske forbruket av strøm er på 133 TWh [13]. Energiforbruket i dette alternativet er beregnet til 182 GWh (175 GWh ved deelektrifisering). Hensyntatt tap i produksjon og transport av strøm og hydrogen gir dette et energibehov på omtrent 303 GWh (242 GWh ved deelektrifisering). Dette strømforbruket utgjør en liten del av det totale strømforbruket i Norge (kun omtrent 0,2 % av totalmarkedet). Alternativet anses derfor ikke å benytte en uforholdsmessig stor andel av en knapp energiressurs – som potensielt kan motvirke omstilling i andre sektorer, og vektas dermed likt som referansealternativet.

#### **6.10.5 Togtilbudets attraktivitet**

##### *Togenes akselerasjonsevne som funksjon av kjøretøy og energitilgang*

Kjøretøy med hydrogendrift har på lik linje med kjøretøy med dieseldrift et batteri og elektriske fremdriftsmotorer. Konseptet vil derfor ha tilsvarende akselerasjonsevne som dagens løsninger og referansealternativet. Skåren er dermed lik som i referansealternativet.

##### *Togenes trekkraft*

Kjøretøy med hydrogendrift har på lik linje med kjøretøy med dieseldrift et batteri og elektriske fremdriftsmotorer. Konseptet vil derfor ha tilsvarende akselerasjonsevne som dagens løsninger og referansealternativet. Skåren er dermed lik som i referansealternativet.

##### *Ulemper for togtilbudet som følge av lade- og tankestopp*

Det er ingen ulemper for driften av togtilbudet som følge av behov for lade- og tankestopp i referansealternativet, og det vil heller ikke være det med hydrogen, ettersom det er lagt til grunn at alle toglinjer kjører fra startpunkt til sluttunkt uten å etterfylle hydrogen. Det er imidlertid antatt lengre fylletider og mer komplisert fyllelogistikk enn for diesel. Skåren er dermed noe negativ i forhold til referansealternativet.

##### *Konsekvenser for effektiv tog lengde*

For lette motorvognsett er brenselceller, hydrogentanker og batterier vanligvis plassert på taket, noe som ikke vil påvirke antall passasjerplasser. For fjern tog er det imidlertid usikkerhet i hvilken grad disse komponentene kan spres ut over flere vogner, ettersom det forutsettes at hydrogentanker og brenselceller er plassert på samme del av kjøretøyet. Det kan derfor være aktuelt å plassere både hydrogen og brenselceller i en bestemt del av motorvognsettet, noe som vil redusere arealet som er tilgjengelig for passasjerplasser.

Lengden og vekten på godstog avhenger av lokomotivets trekkraft, gjeldende overbygningsklasse og lengde på kryssingsspor. Tunge godstog, eller godstog på lange strekninger er avhengig av en energivogn med hydrogen og brenselceller. På enkelte strekninger kan det også være behov for flere energivogner. Dette vil redusere nyttelasten og endre på lønnsomheten i godsoperasjonen.

Som følge av dette, skårer alternativet lavere enn referansealternativet.

##### *Togets aksellast kan realisere hastigheter iht. overbygningsklasse C*

Denne indikatoren vurderer i hvilken grad konseptene medfører økning i aksellasten slik at det påvirker tillatt hastighet i henhold til overbygningsklasser. For motorvogner inntreer det en begrensning i hastigheten hvis aksellasten er over 18 tonn. For godstogene inntreer begrensninger i hastigheten ved 18 tonn og 20,5 tonn. I praksis har godslokomotiver til linjetrafikk alltid en aksellast over 18 tonn.

Overgangen til hydrogen vil medføre behov for oppbevaring av hydrogen og teknisk utstyr om bord i kjøretøyene. Hydrogenlageret er plasskrevende, noe som medfører en viss spredning av den økte vekten. For å frakte tilstrekkelig mengde energi, er det forutsatt 1-2 energivogner på godstogene.

Det er lagt til grunn i hydrogenkonseptet at lokomotivet og energivognen(e) vil ha en akselvekt som ikke overstiger 20,5 tonn. Relativt til konseptet 0, så betyr det at alternativ 2a ikke vil resultere i en lavere makshastighet enn hva som er aktuelt i referansealternativet. Det skal i denne sammenheng nevnes at referansealternativet ikke er et diesellokomotiv, men et bimodalt diesel-kontaktledningslokomotiv.

### 6.10.6 Oppsummering av alternativets effektmåloppnåelse

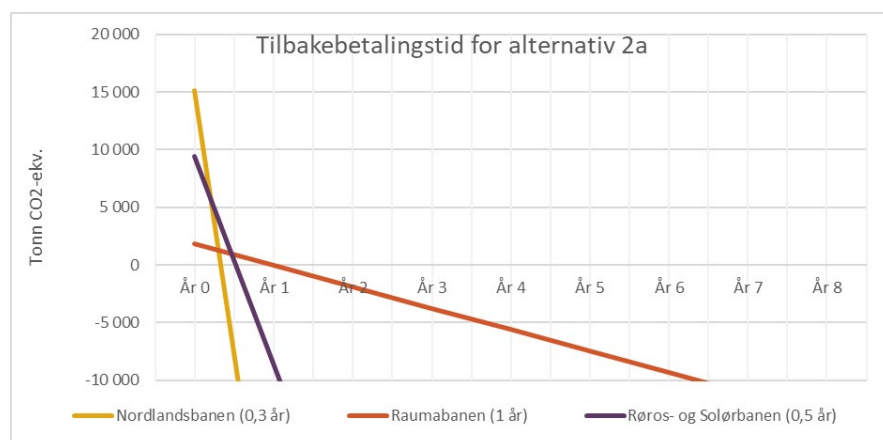
Effektmål	Vurderingsmetode	Måleenhet	Verdi (avrundet)	Relativ skår
1. Utslipp innen 2030	Beregnet CO <sub>2</sub> -utslipp	Tonn CO <sub>2</sub> e årlig gjennomsnitt 2023-2029	<70 000	(+)
2. Utslipp innen 2050	Beregnet CO <sub>2</sub> -utslipp	Tonn CO <sub>2</sub> e årlig gjennomsnitt over levetiden	3 700	+++
3. Energieffektivitet	Energieffektivitet WTW	Prosentvurdering	24-35 %	+
	Forbruk av knappe ressurser	Kvalitativ vurdering	0,2 % av brutto strømforbruk i Norge	0
4. Attraktivitet	Akselerasjonsevne	Kvalitativ vurdering		0
	Trekraft	Kvalitativ vurdering		0
	Lade-og-tankestopp	Kvalitativ vurdering		0
	Effektiv tog lengde	Kvalitativ vurdering		-
	Aksellast	Kvalitativ vurdering		0

### 6.11 Tilfredsstillelse av rammebetingelser

Dersom enkelte av løsningsalternativene ikke tilfredsstiller rammebetingelsene innenfor en tidsperiode, må det tas stilling til om alternativet skal forkastes, eller om det eventuelt kan fungere i en kombinasjonsløsning, eller for deler av jernbanesektoren.

#### 1. Løsningen må ikke bidra til å øke de globale klimagassutslippene.

En forenklet beregning av globale klimagassutslipp viser at utslipp av CO<sub>2</sub>-ekvivalenter i forbindelse med investering er innspart i løpet av 0,4 år for alternativet samlet sett. Se figuren under for fordeling per strekning. Rammebetingelsen anses dermed oppfylt med god margin (se klimavedlegg).



Figur 20 Tilbakebetalingstid for alternativ 2a for de ulike banestrekningene

## 2. Realiserbarhet i drift:

*Løsningen må ha et driftskonsept som muliggjør effektiv drift under forventede fremtidige myndighetskrav.*

Alternativet kan være delvis realiserbart i dag i enkelte driftsopplegg, men dette ventes å kunne endre seg når dagens regelverk blir utviklet videre. Norske Tog har fått prisestimer på fjerntog med kapasitet til å gå tur/retur Nordlandsbanen. Disse er ikke på markedet i dag og det er usikkerhet om de vil kunne bli det. Videre er heller ikke godslokomotiv tilgjengelig i dag.

Det finnes blant annet i Tyskland eksempler på at fyllestasjoner er etablert og at flere er under bygging.

Det er usikkerhet knyttet til lokalisering av fylleanlegg både når det gjelder tilgjengelig areal, størrelse på fylledepotet, og avhengigheter til rutemodeller. Det kan også komme andre krav relatert til sikkerhet som kan komplisere infrastrukturen.

Samlet sett er det stor usikkerhet knyttet til realiserbarheten for alternativet som et samlet energisystem for jernbane knyttet til både lokasjon av hydrogendepoter, regelverk og tilgjengelighet på kjøretøy i alle kjøretøykategorier, med unntak av lette persontog.

Det er vurdert at det er usikkerhet på om denne rammebetingelsen vil kunne oppfylles for alle togkategorier, og for alternativet som et helhetlig alternativt energiforsyningssystem.

## 3. Driftsstabilitet og regularitet:

*En løsning kan ikke gi lavere nivå av driftsstabilitet eller regularitet enn referansealternativet.*

I Tyske prøveprosjekter har det vært noe lavere driftsstabilitet og regularitet med hydrogen enn med diesel. Dette gjelder spesielt hydrogendriften i Frankfurt. Problemene i Frankfurt er mye knyttet til kulde utover det utstyret er dimensjonert for.

Det er også knyttet usikkerhet til om det vil være tilstrekkelig med hydrogenprodusenter, produsert volum, og om det kan leveres hele året. Dette er også knyttet til manglende erfaring av bruk av hydrogen i transportsektoren i Norge.

Det er vurdert at denne rammebetingelsen i dag ikke er oppfylt og at det er usikkerhet om den vil kunne oppfylles på kort sikt.

## 4. Teknologimodenhet:

*Prosjektet skal kun vurdere tilgjengelige teknologiske løsninger som har høy grad av gjennomførbarhet for bruk på norsk jernbane. (tilgang på kjøretøyteknikk og tilgang på infrastrukturteknikk).*

For kjøretøy generelt setter Europe's Rail en TRL nivå på 6-7 ettersom standardiseringen og fylleprotokoller ikke er ferdig utviklet enda.

Videre er det variasjon i tilgangen til kjøretøyteknikk. Det er mulig å anskaffe lette persontogkjøretøy, men dersom hydrogen skal erstatte alle kjøretøytyper som i dag brukes så vil dette kreve en betydelig modning av markedet for blant annet godslok og fjerntogkjøretøy, noe som per i dag må vurderes å ha en lav og usikker TRL nivå.

Infrastruktur: Fyllestasjoner kan etableres i dag, men dagens teknologi gir fortsatt noen begrensninger i fyllehastighet som fører til forlengede fylletider i forhold til 0- alternativet. Som følge av manglende fylleprotokoller er standardisering av fyllegrensesnitt ikke etablert enda og TRL- nivå for fyllestasjoner er dermed usikkert

Det er vurdert at denne rammebetingelsen ikke er oppfylt og at det er usikkerhet knyttet til om den vil kunne oppfylles på kort sikt.

## 5. Interoperabilitet:

*Løsningen må være vurdert mot behovet for interoperabilitet med Sverige for person- og godstoglinjer som går i den grenseoverskridende trafikken.*

Det vil kunne være behov for kompatible fyllestasjoner også på svensk side. Sverige avventer arbeidet med skifte av energibærer og ser hva som blir gjort av Europes Rail og hvilke arbeidspakker som kommer der. Etablering av standardiserte fyllegrensesnitt er en forutsetning for å oppnå denne interoperabiliteten.

Flere internasjonale studier har gjort kartlegginger av regelverk, standarder og gjenstående standardiseringsbehov, både i USA<sup>15</sup> og EU<sup>16</sup>. En særlig god oversikt over aktuelle standarder for bruk av hydrogen i jernbane finnes i en britisk studie fra 2022<sup>17</sup>. Det må anmerkes at regelverk i USA er annerledes enn det som er tilfellet innen Europa

Det er vurdert at denne rammebetingelsen vil kunne oppfylles i fremtiden.

## 6. Standardisering:

*Løsningen må kunne standardiseres i den forstand at løsningen(e) som velges kan bli brukt av alle relevante kjøretøy, og at det legges opp til at fremtidige kjøretøy også kan bruke løsningen(e) uten at det krever særlige tilpasninger og spesielløsninger for hvert kjøretøy.*

I dag brukes generelle standarder og standarder beregnet for veitrafikk for hydrogen og brenselceller for jernbanekjøretøy. Før en storskala etablering av hydrogen for jernbanekjøretøy kan etableres, kreves det standarder rettet spesielt mot jernbane.

Det blir utviklet en standardisering i Europe's Rail, hvor IFE samarbeider med Siemens for å lage en fyllerprotokoll som planlegges å være ferdig i 2026. IEC utvikler også standarder for bruk av brenselceller, tanker og for testing. Videre blir det laget en standardisering for brenselceller.

Standarder under utvikling av IEC

- IEC 63341-1 beskriver bruk av brenselceller om bord i kjøretøy. Planlagt publisering i 2025.
- IEC 63341-2 beskriver bruk av hydrogen om bord i kjøretøy. Planlagt publisering i 2024.
- IEC 63341-3 beskriver ytelseskrav og testmetoder for hydrogendrift av kjøretøy. Planlagt publisering i 2024.

Det er vurdert at denne rammebetingelsen vil kunne oppfylles i fremtiden.

## 7. Samfunnssikkerhet:

*Sårbarheten i forhold til opprettholdelse av jernbanens samfunnsfunksjon må ikke få unødige eller uakseptable økninger. Vesentlig økt risiko for storulykke knyttet til jernbanen må ikke innføres.*

Hydrogen er eksplosivt, og vil ved en ulykke kunne eksplodere. Hydrogenkjøretøyet har også et batteri som vil kunne antenne og være vanskelig å slukke. Etablering av fyllestasjoner for hydrogen introduserer en ny storulykkerisiko i systemet, men om den er vesentlig er noe som må vurderes i hvert enkelt tilfelle ut fra lokalisering og lokale forhold ved det spesifikke anlegget.

Det introduseres ved etablering av fyllestasjoner også et nytt objekt som må sikres mot viljeshandlinger, og som ved mangelfull sikring kan forårsake svikt i jernbanens samfunnsfunksjon.

Det er vurdert at det er usikkerhet knyttet til oppfyllelse av denne rammebetingelsen.

## 8. Tilfredsstillende lover, forskrifter og annet førende regelverk:

*Løsningen må tilfredsstillende minimumskrav i gjeldende norsk og europeisk regelverk, og være akseptabel for de aktører som er ansvarlige for sikkerhet og risiko ved driften, herunder driftssikkerhet, arbeidsmiljø og ytre miljø.*

Det er usikkerhet knyttet til lover, forskrifter og annet førende regelverk for hydrogen. I dag er det ikke noe gjeldende regelverk for hydrogen spesifikt, og flere jernbanespesifikke regelverk inkluderer foreløpig ikke hydrogen.

Det er operatørene på jernbanene som har det totale ansvaret for sikkerheten, og operatørene gjør egne sikkerhetsvurderinger. En uønsket hendelse kan føre til at operatøren mister sikkerhetsattestasjonen eller lisens, og rettighetene til å fremføre tog. Det må derfor være opp til operatørene om de ønsker drift med hydrogen. Det er usikkerhet knyttet til hvorvidt alle operatørene ser det som sikkerhetsmessig og forsvarlig å ta i bruk hydrogen.

---

<sup>15</sup> SANDIA 2021 - Current Efforts in Hydrogen for Rail, Codes and Standards

<sup>16</sup> M. Böhm 2022 - Review and comparison of worldwide hydrogen activities in the rail sector, EU - FCH2 2021 - D1.5 - Hydrogen refuelling and storage requirements for rail vehicles,

<sup>17</sup> UK - RSSB 2021 - Hydrogen policy and standards review



Det finnes ikke et eget regelverk eller egne krav til verksteder for hydrogenkjøretøy, og det er usikkerhet knyttet til om det vil komme egne regler eller krav.

Store deler av regelverket som må tilfredsstilles er regelverk basert på at de ansvarlige for sikkerheten skal gjøre risikovurderinger som konkluderer med at risikoakseptkriteriene er oppfylt. Endringene i de grunnleggende risikoforhold som er knyttet til introduksjon av hydrogen og hydrogen sine brann- og eksplosjonsegenskaper, samt høye lagringstrykk, gjør det vanskelig å forvente at slike analyser skal konkludere med at dette alternativet tilfredsstillende kravene til risikoaksept.

Det er derfor stor usikkerhet til om denne rammebetingelsen kan oppfylles for alle driftsopplegg.

#### **9. Kompatibilitet med dagens teknologi:**

*Løsninger basert på ny teknologi må kunne benyttes samtidig med dagens teknologiske løsning, slik at en smidig overgang til valgt konsept sikres.*

Ettersom hydrogen ikke trenger store infrastrukturtiltak langs sporene, vil ikke bruken av hydrogendrevne kjøretøy medføre uønskede driftspauser i togtrafikken ved utbygging. Hydrogenkjøretøy, dieselskjøretøy og kjøretøy med eventuelle andre energibærere kan også driftes parallelt i en overgangsfase.

Rammebetingelsen vurderes som oppfylt.

#### ***Oppsummering av rammebetingelser***

Alternativet har utfordringer med flere av rammebetingelsene og vil først kunne være aktuelt når rammebetingelsene i norsk og europeisk kommende regelverk er oppfylt, samt at aktørene som er ansvarlig for sikkerhet og risiko gir aksept for drift. Tidspunktet for ferdigstilling av et europeisk regelverk og deretter tidspunkt for at dette regelverket kan tas inn i norsk lovverk, er usikkert.

Det er usikkerhet knyttet til usikkerhet i rammebetingelsene. Vurderingen innebærer at alternativet som helhet vurderes til å ha en høy risiko knyttet til den totale gjennomførbarheten.

# 7 Alternativ 2b – Hydrogen med del-elektrifisering

## 7.1 Beskrivelse av energibærer

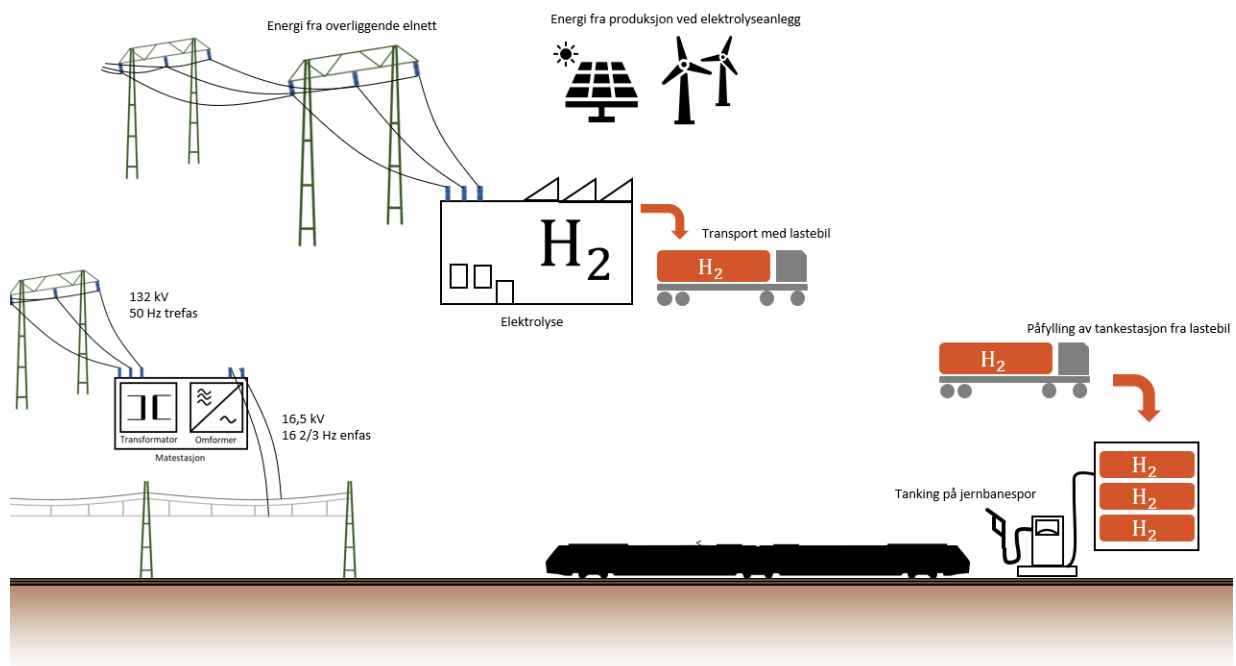
Alternativet er prinsipielt det samme som alternativ 2a. I tillegg innebærer denne varianten elektrifisering av enkelte strekninger med lav investeringskostnad (strekninger uten tunneller, lave fagverksjernbanebruer og lave overgangsbruer) og stort energibehov (store høydeforskjeller). Alternativet vurderes for å avdekke om en slik løsning kan være lønnsom ved bruk av hybride tog som benytter både hydrogen som energibærer og elektrisitet fra kontaktledning.

Den konkrete forskjellen mellom alternativene 2a og 2b er at et antall delstrekninger i alternativ 2b har kontaktledning. Kjøretøyene er hybride og kan framføres både med hydrogen og ved bruk av kontaktledning. Hensikten med alternativet er å kartlegge fordeler og ulemper med kun å etablere kontaktledning på noen få energikrevende delstrekninger.

Det er i hovedsak tre grunner til å del-elektrifisere en banestrekning der kjøretøy drives av hydrogen, gitt at disse også kan framføres med energi fra kontaktledning:

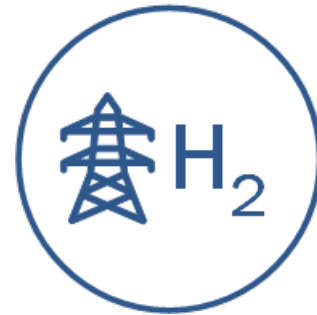
- Redusere driftskostnader ved å redusere bruken av hydrogen
- Muliggjøre økt framføringshastighet på energikrevende strekninger
- Redusere størrelse på hydrogentanken på kjøretøyet

Disse tre sammenfaller på spesielt energikrevende avsnitt. Eventuelle del-elektrifiseringer bør i første omgang foretas på avsnitt som betraktes som flaskehals for energiforbruk, med andre ord bratte oppoverbakker eller områder som gir behov for mange akselerasjoner. Del-elektrifisering på de riktige stedene kan dermed gi lavere driftskostnad, høyere gjennomsnittshastighet og økt transportkapasitet på strekningen i sin helhet.



Figur 21 Illustrasjon av alternativ 2b

**2b** Hydrogen med del-elektrifisering



Alternativ 2b, med ny kontaktledning, transformatorstasjoner og omformerstasjoner, gir en høyere investerings- og vedlikeholdskostnad for infrastrukturen enn alternativ 2a. For å redusere kostnaden for tiltak i alternativet bør det velges ut områder som ikke krever ombygging av tunneler, overgangsbruer og andre konstruksjoner. Nærhet til eksisterende transformatorstasjoner bør også vurderes ved valg av plassering for tiltaket, se konsept 4.

## **7.2 Tekniske løsninger som er lagt til grunn i alternativanalysen**

Dette kapitlet beskriver den tekniske løsningen for alternativet hydrogen med del-elektrifisering.

### **7.2.1 Kjøretøy med hydrogen og kontaktledning som energibærer**

Som alternativ 2a hydrogen. Se 6.1.2 Hybrid kjøretøy som kan benytte både kontaktledning og hydrogen med brenselceller.

### **7.2.2 Fyllestasjoner for hydrogen**

Som alternativ 2a hydrogen. Se 6.2.1 Fyllestasjoner for hydrogen.

### **7.2.3 Plassering av fyllestasjoner**

Som alternativ 2a hydrogen. Se 6.2.2 Plassering av fyllestasjoner

### **7.2.4 Sikkerhetstiltak på fyllestasjoner**

Som alternativ 2a hydrogen. Se 6.2.3 Figur Hydrogenstrekningene i alternativet, med representativt plasserte hydrogenfyllestasjoner.

### **7.2.5 Sidespor til fyllestasjoner**

Som alternativ 2a hydrogen. Se 6.2.5 Sidespor til fyllestasjoner

### **7.2.6 Verksted og beredskapstiltak for hydrogen**

Som alternativ 2a hydrogen. Se 6.2.6 Verksted og beredskapstiltak for hydrogen.

### **7.2.7 Del-elektrifisering**

For å holde kostnader til infrastruktur lave, er det også forsøkt å unngå å elektrifisere gjennom tunneler og under bruer som må bygges om dersom det skal bygges ny kontaktledning. Se kapittel 9.2.1 for nærmere omtale av metode som er benyttet for vurdering av ombyggingsbehov i tunneler.

Simuleringene er utført ved hjelp av en iterativ prosess der godstog er kjørt mellom endepunktene for hver banestrekning for å finne en passende del-elektrifisering som senker forbruket av hydrogen. Dette er beskrevet utførlig i underlagsrapport om simulering. I dette kapitlet presenteres et utvalg av informasjonen.

### Del-elektrifisering av Nordlandsbanen

For Nordlandsbanen er fem strekninger ved Saltfjellet foreslått elektrifisert. Den totale andelen elektrifisering er 10,7 % inkludert eksisterende elektrifisering mellom Trondheim-Stjørdal. I figuren nedenfor vises elektrifiseringen og forslaget til plassering av omformerstasjoner.

Tabell 13 Plassering av omformerstasjoner på Nordlandsbanen i alternativ 2b

Område	Plassering av omformerstasjon / stasjonær ladestasjon	Forsyner strekninger (jernbanekilometring)	Kommentar
Dunderland - Bolna	Bjørnheia, med forsyning fra 132 kV Ørtfjellvegen transformatorstasjon	543,04-575,88	Vil kreve ca. 1 km kraftledning <sup>18</sup> parallelt med eksisterende 132 kV kraftledning.
Lønsdal - Røklund	132 kV Rognan transformatorstasjon, helt inntil jernbanen	596,2 – 633,8	
Andel elektrifisering med kontaktledning		6,1%	Ikke regnet med pågående elektrifisering Trondheim-Stjørdal

### Del-elektrifisering av Raumabanen

For Raumabanen ble det tatt utgangspunkt i forslaget til del-elektrifisering fra batterikonseptet, hvor det er stort energibehov på midten av strekningen der hellingen er som størst. Andelen elektrifisering er på 19,7 %, og i figuren nedenfor vises elektrifiseringen og forslaget til plassering av omformerstasjon.

Tabell 14 Plassering av omformerstasjoner på Raumabanen i alternativ 2b

Område	Plassering av omformerstasjon / stasjonær ladestasjon	Forsyner strekninger (jernbanekilometring)	Kommentar
-	132 kV Grytten stasjon	401,25 – 429,54	Kortere enn 100 m fra jernbanen, synes å være tilgjengelig areal.
Andel elektrifisering med kontaktledning		19,7%	Omfatter ikke eksisterende elektrifisering av Dombås stasjon

### Del-elektrifisering av Rørosbanen

For Rørosbanen er det foreslått en del-elektrifisering på den nordlige delen av banen på strekningen med høyest energiforbruk. Det er tatt utgangspunkt i bygging av en omformerstasjon i Reitan for strømforsyning av to elektrifiserte seksjoner. Andelen elektrifisering landet på 8,1 %, og i figuren nedenfor vises elektrifiseringen og forslaget til plassering av omformerstasjon.

<sup>18</sup> Se nærmere forklaring under konsept 3, kapittel 8.3.

Tabell 15 Plassering av omformerstasjoner på Rørosbanen i alternativ 2b

Område	Plassering av omformerstasjon / stasjonær ladestasjon	Forsyner strekninger (jernbanekilometrering)	Kommentar
Glåmos-Haltdalen	66 kV Reitan transformatorstasjon	422,0 – 455,0	Transformatorstasjonen ligger ca. 350 m fra jernbanen. Virker å være plass for omformerstasjon ved banen på stedet.
Andel elektrifisering med kontaktledning		8,1%	Støren-Hamar

#### Solørbanen

Det inngår ikke del-elektrifisering på Solørbanen i alternativ 2b fordi strekningen er foreslått elektrifisert i sin helhet.



Figur 22 Hydrogenbanestrekninger med utvalgte elektrifiserte strekninger, plassert med estimert lav utbyggingskostnad og høy energiforbruk.

### 7.3 Tiltak i infrastrukturen

Det henvises til omtale under alternativ 2a (generelle tiltak) for beskrivelse av hydrogenfyllestasjoner. Kapitlet om tiltak i infrastrukturen beskriver dette nærmere.

Fordelingen av infrastruktur til elektrifisering for de ulike banene i alternativ 2b er beskrevet i følgende tabell. Som tabellen viser er det unngått å elektrifisere strekninger langs banene som medfører behov for omfattende ombygging av broer og tunneler. Noen slike tiltak inngår, men det primære er investering i selve strømforsyningen (kontaktledningsanlegg og omformerstasjoner).

Tabell 16 Samlet oversikt over infrastrukturtiltak for elektrifisering i alternativ 2b, per strekning

	Nordlands- banen	Raumabanen	Røros- og Solørbanen	Samlet
Omformerstasjoner, inkl. tilkobling til nasjonalt strømnnett	2 stk.	1 stk.	1 stk.	4 stk.
Kontaktledningsanlegg	70 km	28 km	33 km	131 km
Kontaktledningsanlegg på stasjoner og kryssingsspor	3 km	0 stk.	0 km	3 km
Utvidelse av tunnelprofil	0 km, 0 stk.	0 km, 0 stk.	0 km, 0 stk.	0,1 km, 1 stk.
Utvidelse av kun tunnelportal	0 stk.	0 stk.	0 stk.	0 stk.
Ombygging av gang- og sykkelbruer	1 stk.	0 stk.	3 stk.	4 stk.
Ombygging av veibruer	1 stk.	0 stk.	1 stk.	2 stk.
Skjermende tiltak på overgangsbruer	2 stk.	0 stk.	7 stk.	9 stk.
Erstatning av fagverksbru	0 stk.	0 stk.	0 stk.	0 stk.
Tilrettelegging av fagverksbru	0 stk.	0 stk.	0 stk.	1 stk.

### 7.4 Tiltak i kjøretøyflåten

Tiltak i kjøretøyflåten vil være de samme som i alternativ 2a.

### 7.5 Teknologisk modenhet og forventet utviklingsløp

Hydrogen som energibærer på jernbanen er en teknologi i modning. For nærmere omtale av modenhet for hydrogen, se kapittel 6.5.

Elektrifisering er en moden og godt utprøvd teknologi, men del-elektrifisering er ikke en anvendelse av teknologien som vi har erfaring med i Norge, og det er enda ikke utstrakt erfaring med dette internasjonalt. Det henvises til kapittel 9.5 for nærmere omtale.

### 7.6 Samfunnssikkerhet og tilfredstillelse av lover og forskrifter

Det henvises til alternativ 2a Hydrogen for nærmere omtale av dette. Se kapittel 6.6.

### 7.7 Konsekvenser for togtrafikken

Det henvises til alternativ 2a Hydrogen for nærmere omtale av dette. Se kapittel 6.7 for nærmere beskrivelse. I tillegg kommer det noe redusert framføringstid som følge av del-elektrifiseringen.

## Endring i togframføringstid

Kjøretiden er sterkt avhengig av kjøretøyenes effekt. En vesentlig forskjell mellom elektrisk drift og dieseldrift slik som i referansealternativet, er nettopp kjøretøyenes effekt, og dermed også kjøretid. Som en del av simuleringene som er utført i forbindelse med vurdering av konseptene, så er det gjort en vurdering av kjøretid. I simuleringene er det lagt til grunn at kjøretøy på ikke-elektrifiserte strekninger som drives av batteri og brenselcelle, har samme effekt som diesel. Kjøretøy som kjører på elektrifiserte strekninger har høyere effekt, og dermed også raskere kjøretid. For hydrogenalternativet innebærer dette mulige gevinster i kjøretid på de elektrifiserte strekningene. Gevinstene er størst for godstog. Basert på simuleringene er det funnet kjøretidsgevinster av betydning for godstog på strekningene GK25 Trondheim-Bodø på Nordlandsbanen og strekingen GK23 Dombås-Åndalsnes på Raumabanen.

Besparelsene er anslått opp til om lag 25 minutter (5 % av den totale kjøretiden) for strekningen Trondheim-Bodø og opp til lag 15 minutter (3 % av den totale kjøretiden) i motsatt retning. For strekningen Dombås-Åndalsnes er besparelsen anslått opp til 11 minutter (12 % av den totale kjøretiden). For sistnevnte strekning gjelder besparelsen kun i angitt retning som følge av stigningsforholdene på banen. For strekningen GK25 Trondheim-Bodø forutsetter kjøretidsbesparelsen at rutemodellen legges på nytt, og den reelle kjøretidsbesparelsen er derfor avhengig av ventetiden som settes ved kryssinger<sup>19</sup>.

For persontog er kjøretidsgevinstene generelt vesentlig mindre enn for godstog, ettersom persontogene har et gunstigere forhold mellom effekt og vekt, og dermed lettere for å holde linjehastigheten ved lavere effekter. Kjøretidsgevinsten for persontog er funnet å være nær det samme som referansealternativet.

## 7.8 Mulig tidsplan for innføring av alternativet

Det henvises til alternativ 2a. Se kapittel 6.6.

Infrastrukturiltak knyttet til del-elektrifiserte strekninger vil være som for alternativ 3, eller noe mindre, som følge av lavere andel del-elektrifisering. Se kapittel 8.8 for nærmere omtale.

## 7.9 Kostnader

Alternativet Hydrogen med del-elektrifisering, med tilhørende fyllestasjoner, innebærer investeringer i både infrastruktur og kjøretøy. Overordnet består investeringene i infrastrukturen av følgende elementer:

- Utbygging og tilpasninger av kontaktledningsanlegget og kryssingsspor ved stasjoner
- Omformerstasjoner
- Skjermende tiltak
- Etablering av kontaktledningsanlegg
- Fyllestasjoner for hydrogen med nødvendige tilpasninger og infrastruktur
- Verksted- og beredskapstiltak
- Eventuelle nye sidespor for oppstalling under tanking

I det følgende beskrives hovedmomentene i hvilke investerings- og vedlikeholdstiltak som forutsettes i alternativet. Det henvises til kapittel 6.9 for nærmere detaljer om metoder og byggeklosser som er benyttet i beregningen av kostnader.

Tabellene nedenfor beskriver kostnadene til investering i infrastrukturen, fordelt på type element og bane for dette alternativet.

Tabell 17 Investeringskostnader i infrastrukturen i alternativ 2b Hydrogen med del-elektrifisering

Infrastrukturelement	Nordlandsbanen	Rauma-banen	Røros- og Solørbanen
Hydrogen fyllestasjon (del av hydrogendepot)	984	83	667
Jernbanetekniske (del av hydrogendepot)	843	77	548

<sup>19</sup> Notat Kjøretidsgevinst ved elektrifisering



Verksted og beredskapstiltak	968	276	266
Omformerstasjoner, inkl. tilkobling til nasjonalt strømnett	950	475	475
Kontaktledning og høyspentledning	800	298	368
Tilrettelegging av tunneler for elektrisering	0	0	0
Tilrettelegging av bruer for elektrisering	70	0	80
<b>Sum</b>	<b>4 615</b>	<b>1 210</b>	<b>2 403</b>

Vedlikeholdskostnadene for infrastrukturen er i stor grad en konsekvens av de økte kostnadene ved å vedlikeholde kontaktledningsanlegg og omformerstasjoner, samt vedlikehold og fornyelse av fyllestasjoner. Det er også beregnet kostnader til eventuelle nye sidespor for oppstalling av kjøretøy under tanking.

Tabell 18 Vedlikeholdskostnader for infrastrukturen i alternativ 2b Hydrogen med del-elektrifisering

Vedlikeholdskostnader for infrastruktur	Nordlandsbanen	Raumabanen	Røros- og Solørbanen
Sum vedlikeholdskostnader (mill. kr. per år)	24,1	6,7	13,3

Det er forutsatt samme kjøretøyflåte i alle konsepter, med ulike energibærere:

- Regiontog, ca. 110 m lange motorvognsett. Omfatter også regiontog i distrikt, som sannsynligvis vil være kortere enn regiontog til bruk i byområdene.
- Fjerntog, 220 meter lange motorvognsett.
- Godslokomotiv, 6-akslet.

Kjøretøyene vil ha ulike anskaffelseskostnader, avhengig av hvilken energibærer som benyttes. Hydrogenkjøretøy er ikke et ferdig produkt og har dermed en usikkerhet knyttet til anskaffelseskostnad, men vil være dyrere enn dagens dieseldrevne tog.

Tabell 19 Investeringskostnader for kjøretøy forutsatt i alternativ 2b Hydrogen med del-elektrifisering (mill. kr)

Kjøretøytype	Mill. kr. per kjøretøy	Nordlandsbanen	Raumabanen	Røros- og Solørbanen
Regiontog	288	5 184	864	2 304
Fjerntog	941	3 762	0	0
Godstog	238	2 859	477	3 336
<b>Sum</b>		<b>11 806</b>	<b>1 341</b>	<b>5 640</b>

Tabell 20 Batterikostnader for kjøretøy (sum per togkategori per bane) millioner kr/år i alternativ 2b Hydrogen med del-elektrifisering

Kjøretøytype	Nordlandsbanen	Raumabanen	Røros- og Solørbanen
Regiontog	4,3	0,7	1,9
Fjerntog	1,4	0,0	0,0
Godstog	5,7	1,0	6,7
<b>Sum</b>	<b>11,4</b>	<b>1,7</b>	<b>8,6</b>

## 7.10 Oppnåelse av effektmål

### 7.10.1 Reduserte klimagassutslipp innen 2030

Se alternativ 2a, kapittel 6.10.

### 7.10.2 Reduserte klimagassutslipp innen 2050

Alternativet reduserer klimagassutslippet fra persontog og godstog ned mot null, sammenlignet med en videreføring av dagens dieseldrift.

Som vist i vedlegg klimagassutslipp vil alternativet for hydrogen med deelektrifisering ha et totalt klimagassutslipp på 304 097 tonn CO<sub>2</sub> over en periode på 75 år, hvor største delen av utslippet er knyttet til indirekte utslipp i driftsfasen, som da omfatter utskiftning av teknisk utstyr slik som batterier og brenselceller. Alternativet vil være klimanøytralt etter 0,7 år i drift. Alternativet er vurdert å kunne settes i drift i ca. 2035.

### 7.10.3 Energieffektivitet

Energieffektivitet er som for alternativ 2a, men med noe bedre skår, som følge av del-elektrifiserte strekninger.

### 7.10.4 Togtilbudets attraktivitet

Togtilbudets attraktivitet er som for alternativ 2a, men med bedre akselerasjon og trekraft på de del-elektrifiserte strekningene.

### 7.10.5 Oppsummering av alternativets effektmåloppnåelse

Effektmåloppnåelsen for alternativ 2b er oppsummert i følgende tabell.

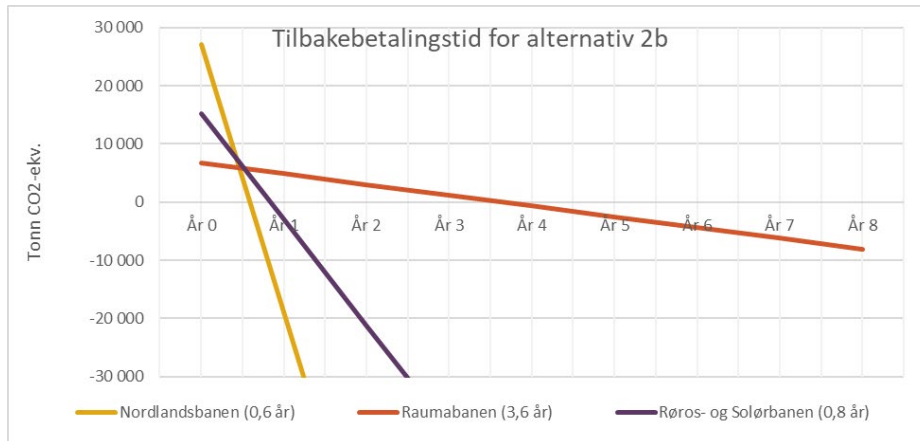
Tabell 21 Oversiktstabell effektmåloppnåelse alternativ 2b

Effektmål	Vurderingsmetode	Måleenhet	Verdi (avrundet)	Relativ skår
5. Utslipp innen 2030	Beregnet CO <sub>2</sub> -utslipp	Tonn CO <sub>2e</sub> årlig gjennomsnitt 2023-2029	<70 000	0
6. Utslipp innen 2050	Beregnet CO <sub>2</sub> -utslipp	Tonn CO <sub>2e</sub> årlig gjennomsnitt over levetiden	4 050	+++
7. Energieffektivitet	Energieffektivitet WTW	Prosentvurdering	25-40 %	+ (+)
	Forbruk av knappe ressurser	Kvalitativ vurdering	0,2 % av brutto strømforbruk i Norge	-
8. Attraktivitet	Akselerasjonsevne	Kvalitativ vurdering		+
	Trekraft	Kvalitativ vurdering		+
	Lade-og-tankestopp	Kvalitativ vurdering		0
	Effektiv tog lengde	Kvalitativ vurdering		-
	Aksellast	Kvalitativ vurdering		0

## 7.11 Tilfredsstillelse av rammebetingelser (hydrogen med del-elektrifisering)

Ettersom elektrifisering kun er et supplement til hydrogen som energikilde i alternativ 2b, er det vurdert at denne konseptvarianten vil ha samme innfrielse av rammebetingelser som alternativ 2a. Se kapittel 6.11 for nærmere beskrivelse.

For rammebetingelse 1, globale klimagassutslipp, viser beregningene i stor grad det samme som for alternativ 2a: En forenklet beregning av globale klimagassutslipp viser at utslipp av CO2-ekvivalenter i forbindelse med investering er innspart i løpet av 0,7 år for alternativet samlet sett. Se figuren under for fordeling per strekning. Denne rammebetingelsen anses dermed oppfylt med god margin (se klimavedlegg).



Figur 23 Tilbakebetalingstid for alternativ 2b for de ulike banestrekningene

Det er usikkerhet knyttet til mange av de øvrige rammebetingelsene, som for alternativ 2a. Vurderingen innebærer at alternativet som helhet vurderes til å ha en høy risiko knyttet til den totale gjennomførbarheten.

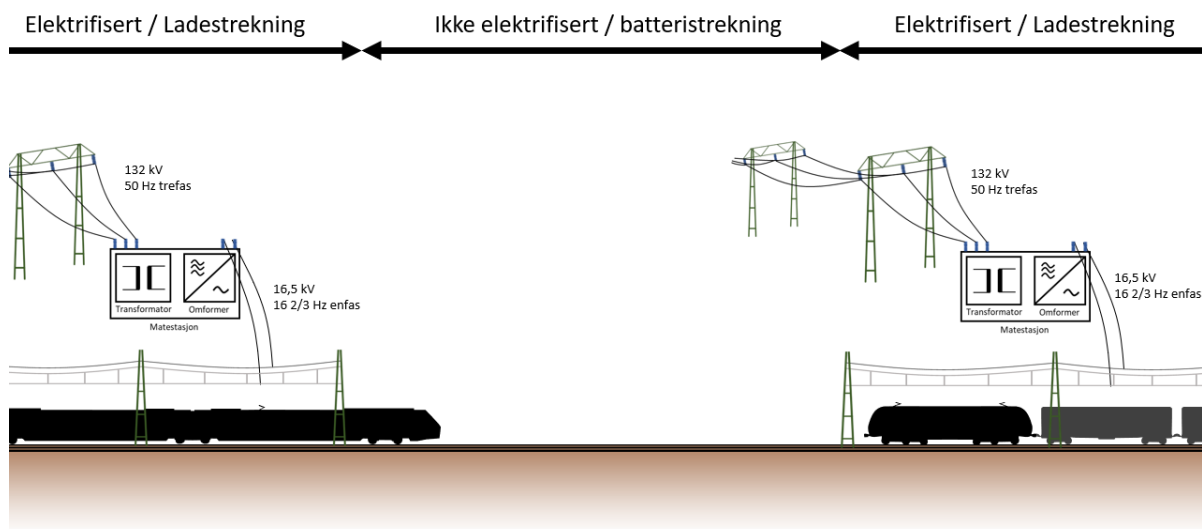
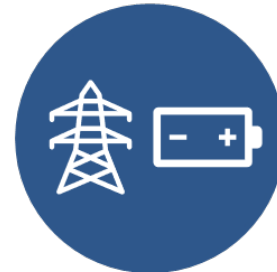
# 8 Alternativ 3 – Batteri

## 3 Batteri

### 8.1 Beskrivelse av energibærer

Alternativet innebærer at kjøretøyene utstyres med batterier som både skal forsyne kjøretøyet med energi for å kjøre en gitt strekning, og som skal dekke sekundærbehov i form av hjelpestrøm slik som lys, oppvarming, ventilasjon og kjøling.

Kjøretøy med batterier som energibærer er i prinsippet bygget opp på samme måte som konvensjonelle jernbanekjøretøy med energiforsyning via kontaktledning, men de vil også kreve en innkobling av batteriene i kjøretøyet elektriske system for energiforsyning på ikke-elektrifiserte strekninger. Kjøretøyet er derfor hybrid (også referert til som «hybrid» i konseptvalgutredningen). Selve plasseringen av batteriene i kjøretøyene avhenger av leverandørens design. For mindre energikrevende lokomotiver kan batteriene eksempelvis plasseres enten som en integrert del av selve lokomotivet, mens det for mer energikrevende lokomotiv vil være mer egnet med en egen vogn (avhengig av energibehov). Her skiller vi på energivogn (som betyr at vognen har utstyr for lading med egen strømvtager) og batterivogn (som betyr at vognen får sin energi fra det tilkoblede lokomotivet). For motorvognsett kan batteriene eksempelvis plasseres på tak, i mellomvogn med midtgang eller under gulv eller i egne tekniske områder. Mulige plasseringer av batterier er indikert i Figur 23, og beskrevet mer inngående i kapittel 8.5.



Figur 24: Prinsipiell løsning for batterikonseptet med lading i bevegelse (del-elektrifisering). Konseptet består av vekselvis elektrifiserte ladestrekninger og ikke-elektrifiserte strekninger der toget går på batteri. Persontog til venstre og godstog til høyre. Blå, skraverte områder på togene illustrerer mulige plasseringer av batterier.

Energimengden som er lagret i batteriene endres etter hvert som kjøretøyet trekker energi fra batteriene. Hvor fort energien forbrukes avhenger av kjøretøyet energibehov, som i sin tur kommer an på kjøretøytype, kjørehastighet, topografi, temperatur etc. Rekkevidden til et kjøretøy med batterier avhenger derfor av den gitte strekningen kjøretøyet trafikkerer, i tillegg til kjøretøyet og batterienes egenskaper.

Når energinivået i batteriene blir lavt må batteriene lades via en ekstern energikilde, noe som krever et ladesystem. Det finnes flere mulige systemer, herunder lading i stillstand ved endepunkter eller opphold underveis, lading i bevegelse via kontaktledning, eller bytte av batteri eller energivogn. Utover at batteriene kan lades fra en ekstern energikilde, så kan batteriene også lades under kjøring ved at energi som genereres ved bremsing mates tilbake i batteriene gjennom såkalt regenerativ bremsing. Valg av

ladesystem er prinsipielt viktig for dette konseptet ettersom det har betydning for den daglige driften på banestrekningene, og måten kjøretøyene bruker infrastrukturen på. Figur 23 viser prinsippene for batterikonseptet med lading i bevegelse via kontaktledning, også omtalt som del-elektrifisering. I eksemplet forsynes de elektrifiserte strekningene av omformerstasjoner.

Overordnede prinsipper for ulike ladesystemer er presentert nedenfor.

### **8.1.1 Prinsipper for lading i stillstand**

Lading i stillstand omfatter energioverføring via kabel eller strømvtager mens kjøretøyet står i ro. Lading i stillstand kan gjennomføres eksempelvis ved endepunktene på linjen, ved stasjoner undervegs på banestrekningen, ved godsterminaler, ved kjøretøyverksteder eller ved et kryssingsspor. Mulighetene for å lade i stillstand er avhengig av hvor raskt batteriene kan lades, og i hvilken grad dette passer med øvrig drift og ruteplan. Lading i stillstand kan f.eks. være aktuelt hvis toget allerede må stoppe på grunn av kryssing med annet tog, personalbytte eller stasjonsopphold, og dersom påvirkningen på ruteplanen er akseptabel.

Fordelen med lading i stillstand er at det ikke krever bygging av lengre strekninger med kontaktledning langs jernbanen, noe som gir store kostnadsbesparelser i infrastruktur. Det er kun nødvendig med kontaktledning på de segmentene der kjøretøyene er stasjonære. Dersom batteriene skal lades via strømvtager i stillstand vil det i hovedsak være to alternativer for infrastruktur. Det kan enten bygges ut konvensjonell kontaktledning med omformerstasjon, eller så kan det bygges en enklere og mindre kostbar variant av matingsstasjon med lavere effekt. Sistnevnte løsning er foreløpig lite utbredt, men den er tilgjengelig, og kan gi vesentlige kostnadsbesparelser hvis det ikke er behov for kapasiteten i en konvensjonell omformerstasjon.

For lading i stillstand er det kun mulig å trekke 80 A (1,2 MW for 15kV) per strømvtager. Tilsvarende vil et kjøretøy i bevegelse kunne trekke 800 A (12 MW for 15kV) per strømvtager. Dette betyr at den mulige ladeeffekten ved lading i stillstand utgjør kun en tiendedel av den som er mulig i bevegelse, noe som igjen betyr at tiden for lading blir betydelig høyere ved lading i stillstand (dersom batteriet er stort og kan lade med mye mer enn 1,2 MW). Dette forutsetter bruk av kun én strømvtager.

Ved hensettingsanlegg vil det være mulig med tilkoblinger (togvarmeposter) på 1000 V og trefase 400 V, som er standardiserte innenfor jernbane. Den førstnevnte er bekreftet av kjøretøysleverandører å kunne gi opptil 500 kW<sup>20</sup> effekt til kjøretøyet, mens den sistnevnte kun er tilstrekkelig for ventilasjon, varme og kjøling. 1000 V tilkobling vil gi mulighet for lading, og å holde batteriene innenfor et akseptabelt temperaturspenn, men med lavere effekt enn med strømvtager. Tilkobling med slike kabler er en manuell prosess, og det er få anlegg som har 1000 V. Utover dette er det ugunstig med hensyn til snø og kulde som forårsaker stive kabler. Løsningen er derfor ikke sett som et gunstig alternativ for lading ved hensetting. Det bør nevnes at dersom hensettingsanleggene elektrifiseres med kontaktledningsanlegg, så vil det anlegget være den primære energiforsyningen (med bruk av strømvtager), noe som er i tråd med Bane NOR sin strategi på dette området. Hvis driftsbanegårdene og hensettingssporene ikke elektrifiseres, så vil nevnte togvarmeposter bli brukt for lading av batteriene.

En grunnleggende forutsetning i konseptvalgutredningen er at bytte av energibærere ikke skal endre togtilbudet og ruteplanen til noe som er mer negativt for de reisende enn det som er aktuelt med dagens teknologi (diesel), se rammebetingelse nummer 4. Det betyr at konseptet med lading i stillestående kun er et realistisk alternativ dersom det kan brukes uten å påvirke ruteplanen negativt. Lading ved stillstand er derfor gunstig der kryssingsspor er parallelt med del-elektrifisering, ved godsterminaler, på endestasjoner, ved hensetting av persontog, ved verksted for persontog, godstog og verksted for arbeidsmaskiner. Lading ved stillstand er vurdert å være ugunstig hvis transporten må stoppe kun for å lade. Arbeidsmaskiner og skiftelokomotiver har bedre forutsetninger for å bruke stasjonær lading.

---

<sup>20</sup> Røros har 2 ulike størrelser: 1000 V multiplisert med 630 A eller 315 A. Effekten blir da 630 kW eller 315 kW. Det er ikke elektrifiserte stasjoner (med diesel) som har slike kraftige anlegg.

### **8.1.2 Prinsipper for lading i bevegelse**

Lading i bevegelse omfatter at deler av en banestrekning elektrifiseres slik at batteriene kan lades via strømvtageren mens kjøretøyene beveger seg på de delene av strekningene der det finnes kontaktledningsanlegg. Systemet omtales også som del-elektrifisering, og strekningene der batteriene lades opp omtales her som ladestrekninger. Ladestrekningene må være tilstrekkelig lange for at kjøretøyene skal få tid til å lade opp batteriene, for så å tilbakelegge turen på en ikke-elektrifisert banestrekning frem til neste lademulighet. Lengden på de ikke-elektrifiserte strekningene der kjøretøyene kan kjøre med batteriene som energikilde avhenger av hvor mye energi toget trenger, og hvor mye energi det er mulig å lagre i batteriene på ladestrekningen. Generelt er ladestrekningene kortere enn strekningene der kjøretøyene benytter batterier som energikilde, slik at graden av elektrifisering blir omtrent 20-40% av den totale strekningen.

Systemet bruker konvensjonelt kontaktledningsanlegg, men det er ikke utelukket at det kan brukes en annen spenning og frekvens enn det som brukes på øvrige nettet, eksempelvis 50 Hz og 25 KV.

Som følge av forutsetningen i effektmål nummer 4 om at løsningen vil vurderes opp mot trafikkapasitet og togfremføringstid, så er det lagt til grunn at lading i bevegelse vil være det mest aktuelle ladekonseptet for toglinjene i denne utredningen. Det vil også være behov for å sikre lademuligheter ved endestasjonene slik at batteriene er fulladet før avgang og at togene kan stå en lengere tid med varme og kjøling uten at det påvirker energimengden i batteriene negativt. Dette vil være en stasjonær lading. En kombinasjon av ladeprinsippene vil derfor være det mest hensiktsmessige for banene i denne utredningen.

Det forutsettes at det vil være mulig å heve og senke strømvtageren mens toget kjører. Det er usikkerhet knyttet til dette tema. I prosjektene med batteritog i Tyskland så stopper togene ved heving og senkning av strømvtager. En mulig løsning i Norge er å bruke standardiserte baliser (av samme type som også brukes i signalsystemet) for å automatisk registrere hvor kjøretøyet skal heve og senke strømvtageren.

### **8.1.3 Prinsipper for batteribytte**

Rammebetingelse nummer 5 for denne utredningen innebærer at prosjektet kun skal vurdere teknologiske løsninger som har høy grad teknologisk modenhet og gjennomførbarhet. Et ladesystem som er basert på batteribytte krever spesialisert infrastruktur, ekstra batterier og spesielt designede kjøretøy. Systemet omfatter vesentlige usikkerheter knyttet til utførelse av batteribytte, som kan påvirke reisetiden i stor grad, samt usikkerheter knyttet til hvordan interoperabiliteten mellom ulike kjøretøy vil fungere med denne typen løsning. Som følge av at løsningen hverken tilbys per nå eller planlegges tilbudt av aktører i markedet innenfor jernbane, er systemet funnet å ikke ha tilstrekkelig grad av teknologisk modenhet og gjennomførbarhet. Den er derfor ikke vurdert nærmere som en del av arbeidet med utredningen. Dette betyr ikke at det er utelukket å analysere det i en seinere fase dersom batteriteknologi blir anbefalt for en eller flere strekninger og/eller kjøretøykategorier. F.eks. kan batteribytte være aktuelt for noen arbeidsmaskiner særlig fordi de opereres av teknisk personell og i noen tilfeller har tilgang på kran for løfting. Dette vil være en del av avveininger ved valg av batterier, ladesystem og ladestrekninger.

Togfremføring ved hjelp av batterier med ladesystem utgjør et komplekst system der flere frihetsgrader og aspekter må ivaretas. Herunder må sammenhengen mellom kjøretøyenes energibehov ved fremføring gitt topografien på de aktuelle banestrekningene, og batterienes egenskaper i form av blant annet ladehastighet, utladingshastighet, energimengde, vekt, volum etc. optimaliseres. Ladetiden for en batteripakke avhenger av hvor stor effekt batteriene kan ta imot, og hvor stor effekt som kan leveres til kjøretøyet for lading.

Kjøretøyetets effektbruk til fremføring og hjelpestrøm sammen med batterienes og banestrømforsynings egenskaper påvirker hvor mye batteriene blir ladet per kilometer ladestrekning, og dermed også hvor lange eventuelle ladestrekninger må være. Behov for store ladeeffekter for å gi rask lading har også påvirkning på dimensjoneringen av kjøretøyetets transformator og likeretter. Dette vil kreve mer plass, og komponentene vil i tillegg bli tyngre. Kjøretøyleverandørene vil derfor måtte gjøre avveininger knyttet til hvordan de prioriterer bruken av tilgjengelig bæreevne for vekt og tilgjengelig volum til batterier. På et overordnet nivå bør ladestrekninger og omformerstasjoner plasseres slik at strømforsyning er tilgjengelig og omformerstasjonene kan plasseres på steder som er egnede for formålet. I tillegg er samspillet mellom ulike kjøretøy og banestrømforsyningen også et aspekt som må ivaretas når flere typer kjøretøy benytter samme omformerstasjon. Da vil kravene til ladehastighet på batteriet måtte tilpasses slik at det oppnås et

gunstig samspill mellom ulike kjøretøy og tilgjengelig banestrømforsyning. Målet er å tilpasse kjøretøyenes batterielektriske egenskaper og infrastrukturens egenskaper slik at en hensiktsmessig bruk av batterikapasiteten oppnås. Dette vil kunne gi begrensninger i ladehastighet og energimengde i batteriene for enkelte kjøretøytyper avhengig av hva det er hensiktsmessig for leverandørene å dimensjonere kjøretøyene for.

Optimalisering av ladesystem med hensyn til energibehov og batteriegenskaper må igjen sees i sammenheng med ruteplan og driftsopplegg for å gjøre avveininger mellom lading i stillstand og lading i bevegelse. Hvor togene ofte møtes, skiftendringer, stasjoner for passasjerservice, godsdepoter og hensetting avgjør hvilke muligheter for lading i stillstand som finnes uten å innføre vesentlig ekstra tidsbruk som følge av lading. Det er også lite hensiktsmessig å investere i elektrifisering av en bestemt delstrekning dersom togene fortsatt må stoppe like etterpå som følge av driftsopplegget. Generelt har lading i bevegelse en fordel ved at man unngår ekstra tidsbruk til lading. Lading i stillstand ved hjelp av tradisjonelt kontaktledningsanlegg, eller enkelte andre tilgjengelige teknologier, har også en begrensning i ladeeffekt som gir relativt lave ladehastigheter. Andre stasjonære løsninger, som eksempelvis kabel, kontaktarm eller lading fra et stort batteri på stasjon, har ikke nødvendigvis slike begrensninger.

Videre må konseptet være robust i forhold til å håndtere ulike kjøretøytyper som skal trafikkere banestrekningene, og robust for økt energiforbruk knyttet til klimaanlegg og økt kjøre motstand som resultat av snø. Et godstog vil generelt kreve mer av systemet enn et persontog i form av ladeeffekt og tid til lading. Fra et økonomisk perspektiv bør eventuelle ladestrekninger plasseres slik at investeringskostnaden blir lavest mulig. Elektrifisering av bruer og tunneler er kostnadsdrivende, og ladestrekninger bør fortrinnsvis legges der utbygging av infrastruktur er mindre kostnadsdrivende. Videre bør marginalkostnaden ved elektrifisering sees opp mot kostnaden for batterier som har egenskaper som gir ønsket rekkevidde. Generell utvikling av batteriteknologi over tid vil også mest sannsynlig medføre forbedringer av batteriegenskaper som påvirker energimengde (rekkevidden) og ladeeffekt (lengde på ladestrekninger eller tid i stillstand for lading).

Når ladeinfrastruktur for batteridrevne jernbanekjøretøy skal planlegges, er det viktig å vurdere plasseringen og kapasiteten til ladesystemet for de spesifikke banestrekningene med aktuelle forutsetninger. For å sikre kostnadseffektive løsninger kan forskjellige systemer være optimale for forskjellige jernbanestrekninger.

## **8.2 Tekniske løsninger som er lagt til grunn i alternativanalysen**

Som grunnlag for analyse av konseptet er det gjennomført energisimuleringer på de aktuelle banestrekningene. Som beskrevet i det foregående delkapittelet så utgjør konseptet et komplekst system der det må tas hensyn til mange faktorer, og det er en sterk avhengighet mellom valg av batteriteknologi, ladesystem og del-elektrifisering.

### **8.2.1 Lade infrastruktur og tilpasning til kjøretøykategorier**

En av de mest sentrale forutsetningene som er lagt til grunn er bruk av lading i bevegelse og lading i stillstand på endestasjoner (Bodø og Åndalsnes) ved hjelp av konvensjonell strømvatager på elektrifiserte strekninger. I tillegg er det vurdert lading i stillstand ved endepunkter på Nordlandsbanen og Raumabanen. Valg av ladesystem skyldes primært effektmål nummer 4 om at løsningen vil vurderes opp mot trafikkapasitet og togfremføringstid. En annen sentral forutsetning er at det er benyttet godstog på 1200 tonn i simuleringene for å foreslå en hensiktsmessig del-elektrifisering. Godstog er benyttet for dimensjonering av del-elektrifisering ettersom de krever lengre ladestrekninger og kortere batteristrekninger sammenlignet med persontog. Del-elektrifiseringen er plassert der hvor det er stort energibehov, samtidig som de fleste tunneler og overgangsbruer unngås (noe som reduserer kostnaden for tilpasninger i infrastrukturen), samt at det for alle toglinjene på banen finnes mulighet for lading som er rimelig gitt toglinjens plassering og type kjøretøy.

### **8.2.2 Batteriteknologi**

Når det gjelder valg av batterier så er det i simuleringene brukt høyeffektbatterier fremfor høyenergibatterier. Det er flere årsaker til at det er valgt høyeffektbatterier. Den første er levetiden, der

simuleringene viser at det sannsynligvis kreves høyeffektbatterier for å få en levetid i området +10 år. Høyeffektbatterier kan produsere 5-10 ganger antall sykluser som et høyenergibatteri. Disse batteriene har også høyere sikkerhet og stabilitet. Eksempelvis er risikoen for brann, også kalt «thermal runaway», mindre enn for et høyenergibatteri. Høyeffektbatterier kan også lades raskere enn høyenergibatterier uten redusert sikkerhet, opp til 10 C mot tilsvarende ladehastighet på 2 C for høyenergibatterier). Det ligger en konservativ tilnærming i KVV GREEN på elektrifiseringsgrad i del-elektrifiseringsforslaget. Dvs. mengde elektrifisering er noe høyere enn tidligere selv om vi benytter batterier med høy C (lade med høyere skal gi kortere lade strekninger).

En ulempe med høyeffektbatterier er energitettheten, noe som påvirker totalvekten for batteripakken. En annen ulempe er prisen per installert energimengde, som er vesentlig høyere enn for høyenergibatterier. Dette utdypes i kapittel 8.5.

### 8.2.3 Omformerstasjoner

De forutsettes AT-system, og det forutsettes bruk av nye, statiske, omformerstasjoner. Effektbehov for omformerstasjon er 2x18 MVA. Det er to omformere per stasjon, for å sikre redundans i strømforsyningen både i drift og vedlikehold av disse. Bane NOR har et overskudd av eldre roterende omformere som kan brukes for mating av del-elektrifiseringsstrekninger. Dette bør undersøkes nærmere i videre arbeid, og kan potensielt redusere kostnadene til elektrifisering.

Det forutsettes bruk av restkapasitet i eksisterende omformere, der dette er kjent. Dette gjelder Hamar og Kongsvinger omformerstasjoner.

### 8.2.4 Kontaktledningsanlegg

Som forklart i kapittel 9.2 så vil standard kontaktledning, som er kontaktledningsanlegg med AT og el-utforming E for enkeltsporede strekninger, legges til grunn i det videre arbeidet for del-elektrifiseringen i konsept 3 Batteri. Det er forutsatt at byggingen av infrastrukturen vil gjennomføres med skiftarbeid (bruk av hvite tider) for å gi minst mulig forstyrrelse av trafikken i anleggsperioden.

## 8.3 Tiltak i infrastrukturen

Tiltak i infrastrukturen for batterikonseptet omfatter ladestasjoner og infrastruktur for lading, omformerstasjoner, kontaktledning og høyspentledning, tilrettelegging av tunneler og bruer for elektrifisering, verksted- og beredskapstiltak. For å konkretisere og anslå mengder og plassering av de ulike elementene er det gjennomført simuleringer som blitt brukt for å finne en passende del-elektrifisering for banene.

Innledningsvis i dette kapitlet presenteres en oppsummering av infrastrukturen i konseptet. Deretter beskrives forutsetningene nærmere per bane.

Tabell 22 Samlet oversikt over infrastrukturtiltak i konsept 3, per strekning

Infrastrukturkategori	Nordlands-banen	Raumabanen	Røros- og Solørbanen	Samlet
Omformerstasjoner, inkl. tilkobling til nasjonalt strømnnett	6 stk.	1 stk.	2 stk.	9 stk.
Kontaktledningsanlegg og høyspentledning langs sporet	286,5 km	50,6 km	284,4 km	621,5 km
Kontaktledningsanlegg på stasjoner og kryssingsspor	14,3 km	2,4 km	8,5 km	33 km



Utvidelse av tunnelprofil	0,1 km, 1 stk.	0 km, 0 stk.	0,1 km, 1 stk.	0,2 km, 2 stk.
Utvidelse av kun tunnelportal	0 stk.	0 stk.	0 stk.	0 stk.
Ombygging av gang- og sykkelbruer	1 stk.	0 stk.	4 stk.	5 stk.
Ombygging av veibruer	2 stk.	0 stk.	10 stk.	12 stk.
Skjermende tiltak på overgangsbruer	23 stk.	0 stk.	32 stk.	55 stk.
Erstatning av fagverksbru	0 stk.	0 stk.	2 stk.	2 stk.
Tilrettelegging av fagverksbru	4 stk.	0 stk.	0 stk.	1 stk.

### 8.3.1 Simuleringene

Simuleringene er utført ved hjelp av en iterativ (gjentakende) prosess der godstog er kjørt mellom endepunktene for hver banestrekning for å finne en passende del-elektrifisering med tilfredsstillende lading av batterier og minimert utbyggingskostnad. Simuleringer, og prosessen for arbeidet med å komme frem til foreslåtte del-elektrifisering, er beskrevet utførlig i delrapport Energisimulering KVV GREEN (Se kapittel 13.4). I dette kapittelet presenteres et utvalg av informasjonen.

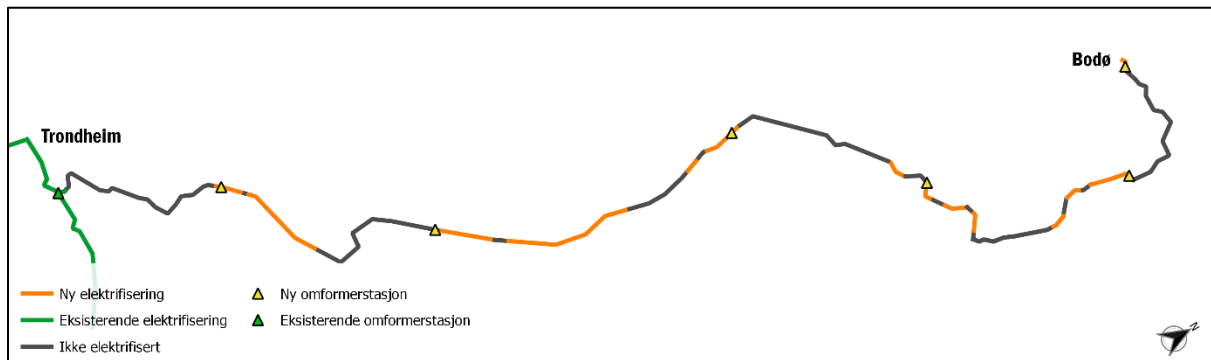
### 8.3.2 Del-elektrifisering av Nordlandsbanen

For Nordlandsbanen er det tatt utgangspunkt i forslaget til del-elektrifisering fra NULLFIB2 [14], med noen justeringer med hensyn til overgangsbruer, tunneler og energinivå i batteriet. Andelen elektrifisering landet på 34,5 %. Tabell 23 beskriver del-elektrifiseringen for strekningen, mens Figur 24 viser forslaget til del-elektrifisering og plassering av omformerstasjoner.

Tabell 23 Plassering av omformerstasjoner ved del-elektrifisering for Nordlandsbanen i konsept 3

Område	Plassering av omformerstasjon / stasjonær ladestasjon	Forsyner strekninger (jernbanekilometring)	Kommentar
Steinkjer - Sarrgrasmyra	2 km nord for Steinkjer jernbanestasjon, ca. 300 m nord-øst for 66 kV Steinkjer transformatorstasjon.	119,5-179,0	Se vedlegg om infrastrukturforutsetninger for bilde med plassering
Lassemoen-Majavatn	Tunnsjødal transformatorstasjon.	254,0 - 341,1	Det vil være behov for 4,5 km 66 kV kraftledning frem til jernbanen. God kapasitet med 420 kV tilknytning.
Eiterstraum - Mosjøen	Mosjøen stasjon, industrielt baneområde rett øst for stasjonen.	379,2 - 410,4	Nærhet til 145 kV Mosjøen transformatorstasjon.
Mo i Rana - Dunderland	Bjørnheia, med forsyning fra 132 kV Ørtfjellvegen transformatorstasjon.	497,8 - 562,9	Vil kreve ca. 1 km kraftledning parallelt med eksisterende 132 kV kraftledning.

Lønsdal - Rognan	132 kV Rognan transformatorstasjon, helt inntil jernbanen.	600,3 – 648,0	
Bodø	132 kV Tjønndalen transformatorstasjon, helt inntil jernbanen. Synes å ha god mulighet til å ha kapasitet for utvidelse, samt plass til nærliggende omformerstasjon.		Unngår behov for krevende plassering i Bodø.
Andel elektrifisering (kontaktledningsanlegg):		35,0% (242,8km av 693,8km ikke inkludert høyspentledning, 286,5km inkludert høyspentledning)	Ikke regnet med elektrifiseringen planert til Stjørdal (Stjørdal-Bodø utgjør cirka 693,8 km)



Figur 25 Kart med illustrasjon av del-elektrifisering og plassering av omformerstasjoner på Nordlandsbanen.

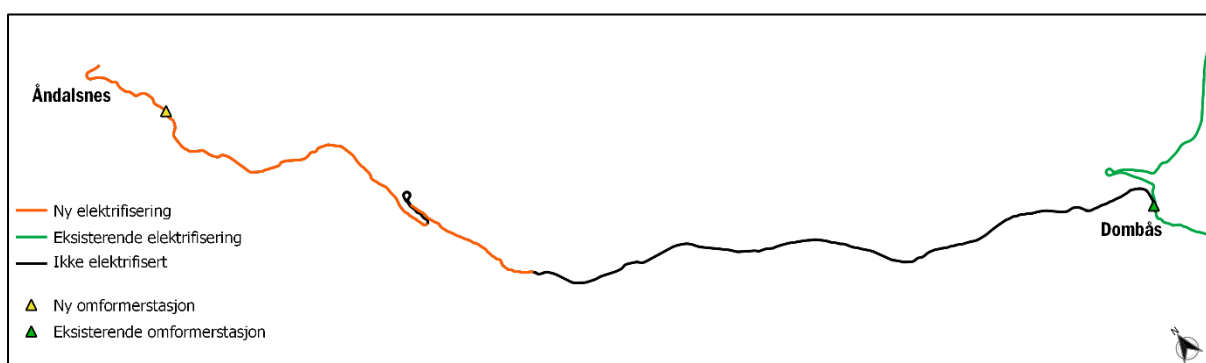
Som vist i tabellen og figuren er det foreslått 6 omformerstasjoner. Dette antallet ligger til grunn for estimat for investeringskostnader.

### 8.3.3 Del-elektrifisering av Raumabanen

For Raumabanen ble det tatt utgangspunkt i forslaget til delelektrifisering fra NULLFIB2 [14] med elektrifisering plassert midt på strekningen Åndalsnes-Dombås. Der er energibehovet stort grunnet stor stigning. Det er imidlertid ikke mulig å plassere en omformerstasjon tett på dette området, og analysen viste at en plassering av omformerstasjon på Grytten vil være optimal. Det medfører at det vil være behov for kontaktledningsanlegg fra Grytten og oppover på store deler av strekningen med størst stigning. Utover dette er det behov for lademulighet på Åndalsnes stasjon, noe som motiverer en elektrifisering fra Grytten ned til Åndalsnes. Andelen elektrifisering ble til slutt på 43,8 %. Tabell 24 beskriver delelektrifiseringen for strekningen, mens Figur 25 viser forslaget til delelektrifisering og plassering av omformerstasjon. Det skal nevnes at det elektrifiseres på den delen av strekningen hvor energibehovet er størst og hvor elektrifiseringen gjør størst nytte for batteridriften. Det sammenfaller med å være på et av de mest spektakulære punktene på det norske jernbanenettet. En eventuell miljømessig påvirkning på landskapsbildet er ikke vurdert.

Tabell 24 Plassering av omformerstasjoner ved del-elektrifisering på Raumabanen i konsept 3

Område	Plassering av omformerstasjon / stasjonær ladestasjon	Forsyner strekninger (jernbanekilometrer)	Kommentar
Åndalsnes	132 kV Grytten stasjon (omtrent ved km 448)	401,50 – 457,25	Kortere enn 100 m fra jernbanen, synes å være tilgjengelig areal.
Andel elektrifisering (kontaktledningsanlegg):		44,3 % (50,60km av 114,20km)	(Dombås-Åndalsnes utgjør cirka 114,20 km)



Figur 26 kart med illustrasjon av delelektrifiseringen og plassering av omformerstasjoner på Raumabanen.

Som vist i tabellen og figuren er det foreslått 1 omformerstasjon og 1 ladestasjon. Dette antallet ligger til grunn for estimat for investeringskostnader. Som en del av videre bearbeiding av konseptet er det også foreslått en alternativ infrastruktur, se kapittel 8.3.1.

### 8.3.4 Delelektrifisering av Rørosbanen

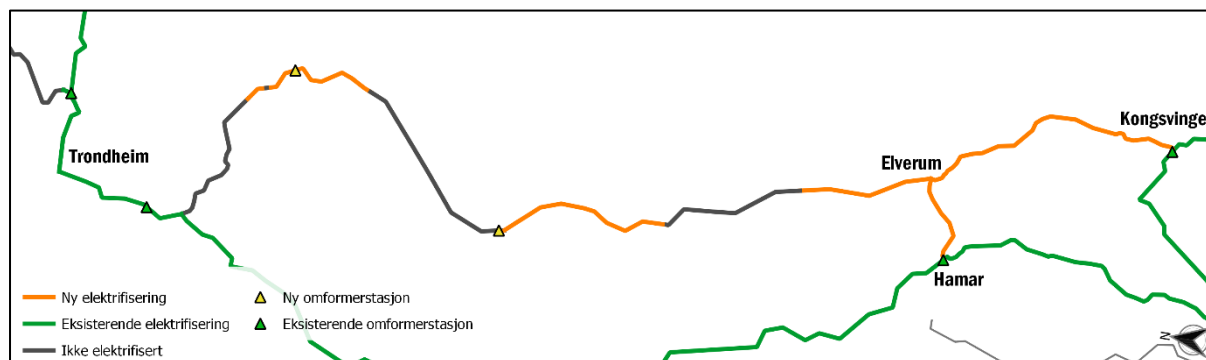
For Rørosbanen er det foreslått en del-elektrifisering hvor den sørlige delen av banen benytter en omformerstasjon som også forsyner hele Solørbanen. For Røros- og Solørbanen er det funnet at det er planlagt bygging av en ny omformerstasjon i Hamar, som vil ha mulighet for å forsyne hele strekningen Hamar - Elverum - Kongsvinger. Derfor er det foreslått å bruke den nye omformereren som bygges i Hamar, og kapasiteten fra den eksisterende elektrifiseringen i Kongsvinger.

I tillegg til Elverum er det plassert to omformerstasjoner langs banen. Andelen elektrifisering landet på 49,5%. Tabell 25 beskriver delelektrifiseringen for strekningen, mens Figur 26 viser forslaget til delelektrifisering og plassering av omformerstasjoner.

Tabell 25: Plassering av omformerstasjoner ved delelektrifisering for Rørosbanen i konsept 3

Område	Plassering av omformerstasjon / stasjonær ladestasjon	Forsyner strekninger (jernbanekilometrer)	Kommentar
Hamar-Elverum-Rena	Benytter omformerstasjon i Hamar	126,26-191,95	Strekningen forsynes av eksisterende omformerstasjon
Atna-Bellingmo	132 kV Savalen kraftverk rett nord for Alvdal	257,65– 322,55	
Glåmos-Haltdalen	66 kV Reitan transformatorstasjon	395,85 – 455,00	Transformatorstasjon en ligger ca 350 m fra jernbanen. Virker å

		være plass for omformerstasjon ved banen på stedet.
Andel elektrifisering (kontaktledningsanlegg):	49,5%. (189,7km av 383,5km)	(Hamar-Støren utgjør cirka 383,5 km)



Figur 27: Kart med illustrasjon av delelektrifisering og plassering av omformerstasjoner på Rørosbanen og Solørbanen.

Som vist i tabellen og figuren er det foreslått 3 omformerstasjoner. Dette antallet ligger til grunn for estimat for investeringskostnader. Som en del av videre bearbeiding av konseptet er det også foreslått en alternativ infrastruktur, se kapittel 8.3.1.

### 8.3.5 Delelektrifisering av Solørbanen

Hel-elektrifisering av Solørbanen er anbefalt fordi det vil bygges en omformerstasjon i Hamar som vil kunne forsyne Solørbanen sammen med kapasiteten fra den eksisterende elektrifiseringen i Kongsvinger. Det betyr at det bare er kostnaden for kontaktledningsanlegg som vil tilkomme for Solørbanen. Kongsvinger-Elverum utgjør cirka 95 km. Hel-elektrifisering av Solørbanen vil medføre en vesentlig fordel ved at godstrafikken som kommer fra Dovrebanen og Rørosbanen, ned til Elverum-Kongsvinger og videre til Sverige, da kan gå hel-elektrifisert der det i dag er behov for skifte til diesellokomotiv eller bimodale dieselskjøretøy for fremføring på Solørbanen.

Som beskrevet i forrige kapittel for Rørosbanen så er det planlagt bygging av en omformerstasjon på Hamar.

### 8.3.6 Samlet delelektrifisering av alle banestrekninger

Figur 27 illustrerer delelektrifisering og plassering av omformerstasjoner for alle banestrekninger i samme kart. Her er det tydelig at flere av toglinjene vil benytte eksisterende elektrifisering på strekningen Støren-Stjørdal.



Figur 28: Foreslåtte delelektrifiserte strekninger basert på innledende simuleringer for å gi tilfredsstillende lading av batterier og minimere utbyggingskostnad.

## 8.4 Tiltak i kjøretøyflåten

Det er forutsatt samme antall kjøretøy som for referansealternativet i alle konsepter, se kapittel 3.2.2.

Det vil være behov for å anskaffe batteridrevne kjøretøy som er hybride kjøretøy i den forstand at de også har strømvagter som brukes for lading og forsyning av motorer og hjelpeutstyr på elektrifisert strekning.

For regiontog og regiontog i distrikt finnes det eksisterende produkter på markedet som tilsvarer kjøretøyene som er lagt til grunn i denne KVVU-en. For lengre persontog, som fjerntog, vurderes det å være mulig å anskaffe slike kjøretøy selv om produktet ikke er levert enda. Dette utdypes i kapittel 8.5. Det vil ikke være behov for endringer i hvordan kjøretøyflåten for persontog må se ut (f.eks. antall tog) og anskaffes i den forstand at det ikke vil være helt andre type kjøretøy som anskaffes. Det som vil påvirkes er hvordan energilageret integreres i kjøretøyet. Dette forholdet vil bli ivaretatt i fremtidige anskaffelser. Det vil stilles krav til at kjøretøyene som anskaffes må kunne trafikkeres spesifikke strekninger, noe som gjør at kjøretøyprodusenter vil dimensjonere energilagringen utfra den trafikkoppgave som skal utføres og med hensyn til infrastrukturen. Fremtidig utvikling vil også kunne påvirke hvordan batteriene integreres i kjøretøyene. Anskaffelsen av slike kjøretøy kan være en separat anskaffelse med forskjellige typer

persontog, eller så kan anskaffelsen være en del av en større kontrakt som også leverer kjøretøy til elektrifiserte strekninger. I det siste tilfellet vil batteridrevne kjøretøy sannsynligvis være en mindre del av kontrakten.

For godslokomotiver vil det være behov for anskaffelse av batterilokomotiver. Det er lagt til grunn et konsept med lokomotiver og batterivogn med førerhus som ikke enda finnes på markedet, men hvor konseptet er foreslått og vurdert av kjøretøyprodusenter. Dette utdypes i kapittel 8.5. Konseptet gir ikke behov for endringer i driftsopplegget, og det vil heller ikke være behov for justering av antall lokomotiver. Det som vil endres er kravspesifikasjonen til lokomotivene. Konseptet med energivogn forutsetter videre at lokomotivene som anskaffes kan brukes uten energivogn og framføres som konvensjonelle elektriske lokomotiv (når/hvis energivognen kobles fra lokomotivet).

Løsningen kan redusere utfordringer ved anskaffelse, da behovet for antall lokomotiver i Norge tilsier at det i beste fall blir kommersielt interessant for en kjøretøyprodusent å utvikle én ny lokomotivtype. Det er imidlertid fortsatt en stor risiko for at behovet ikke er stort nok til å etablere et marked med flere potensielle leverandører.

Tabell 26 Kjøretøy lagt til grunn for konsept 3 Batteri

Kjøretøytype	Nordlandsbanen	Raumabanen	Røros- og Solørbanen	Samlet
Regiontog hybrid batteri-el	18	3	8	29
Fjerntog hybrid batteri-el	4	0	0	4
Godslokomotiv hybrid batteri-el	12	2	14	28

## 8.5 Teknologisk modenhet og forventet utviklingsløp

Jernbanekjøretøy med batteridrift er historisk sett en forholdsvis ny teknologi, selv om det finnes «eldre» eksempler på batteridrift i andre skinnegående kjøretøy, som f.eks. trikk. I det følgende blir det oppsummert hvordan den teknologiske modenheten ser ut for batteriteknologi til jernbanen generelt, og hvordan den ser ut for spesifikke kjøretøykategorier.

### 8.5.1 Batteriteknologi for jernbanekjøretøy

I NULLFIB2 [15] ble det gjort en analyse av batteriteknologi, og hvordan den ser ut i en jernbanekontekst. Informasjonen i påfølgende avsnitt er hentet fra arbeidet som ble utført i NULLFIB2, og supplert der det finnes oppdatert informasjon.

Batteridrift for jernbanekjøretøy har vært i rask utvikling de seneste syv årene. Flere leverandører av jernbanekjøretøy har på relativt kort tid utviklet konsepter for bruk av batterier til fremføring av jernbanekjøretøy. De fleste løsningene som er under testing og levering er av typen kortere motorvognsett for bruk i Sentral-Europa, og spesielt i Tyskland. Det finnes også løsninger og produkter som er blitt levert og testes for lokomotiver til godstrafikk. Disse er primært testet på det Nordamerikanske markedet.

Batterier til fremdrift av jernbanekjøretøy er blitt stadig mer aktuelt som et resultat av utviklingen innenfor batteriteknologi generelt, og etterspørselen etter nullutslippsalternativer til diesel som energibærer. I denne sammenhengen er det viktig å merke at utviklingen innenfor batteriteknologi for kjøretøy primært drives av etterspørselen innenfor veikjøretøy, der det er snakk om et stort antall kjøretøy og høy etterspørsel. For andre transportsegmenter som luftfart, skip og jernbane er det blant annet større krav til levetid og robusthet enn i bilindustrien. I tillegg kan driftsformen medføre høyere krav til sikkerhet og driftsstabilitet, noe som igjen medfører tidkrevende prosesser for godkjenning og store krav til dokumentasjon av sikkerhet. Innføring av ny teknologi vil derfor sannsynligvis gå noe langsommere i jernbaneindustrien enn i bilindustrien. Dette forsterkes også av at investeringer i jernbanekjøretøy er store beslutninger som ofte er knyttet til omfattende offentlige innkjøpsprosesser, noe som gir lange ledetider knyttet til selve innkjøpene.

### Batteriprodukter på markedet og svar fra RFI

Det finnes flere leverandører av batterisystemer på markedet, og disse markedsfører både høyenergi- og høyeffektbatteripakker for bruk i tog. Informasjonen her er innhentet fra leverandørenes egne nettsider og fra RFI-svar. Produktene er testet i prototyper, og noen også i drift. Basert på informasjonen så fremstår den tekniske modenheten for litium-ion-batterier for bruk til fremdrift av tog, som høy, og det vurderes at den er på nivå 8-9.

Det finnes flere kjente litium-ion batterityper for kjøretøy, og hvor disse forenklet kan deles inn i 3 kategorier:

- **Høyenergi.** De med høyest energitetthet inneholder kobolt. To eksempler er NMC (Lithium Nickel Manganese Cobalt) og NCA (Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxide). Det finnes også en mulighet at så kalte fast stoff batterier som ofte omtales som solid state batterier kan bli aktuelt innenfor de nærmeste 10 åren, men en slik utvikling er vanskelig å bruke for noe annet enn spekulasjon. Disse vil ha høyere energitetthet enn dagens høyenergibatterier og de finnes kilder som peker på at de kan komme allerede 2025, og at de dermed vil være realistisk for bruk av jernbanen etter 2030.
- **Medium energi.** Lang levetid, lavere pris. To eksempler er LFP (Lithium Iron Phosphate) som ofte benyttes i busser og LNMO (Lithium Nickel Manganese Spinel Cathode). LNMO er allerede publisert for 2025 av norske batteriprodusenten Morrow.
- **Høyeffekt.** Lav energitetthet (energi målt i forhold til vekt og volum). Ett eksempel er LTO (Lithium Titanium Oxide). Disse har høyere sikkerhet enn høyenergibatterier og tåler raskere lading.

I Tabell 15 forklares kun høyenergibatterier (typisk NMC/NCA som benytter kobolt), og høyeffektbatterier (typisk LTO). Disse er begge litium-ion-batterier, som er aktuelle batterikjemier til bruk i batterier for kjøretøy. Det er lagt til grunn konservative verdier basert på markedet i 2023. Energitetthet på cellenivå vil være 2-3 ganger høyere sammenlignet med pakkenivå.

Tabell 27 Egenskaper for høyenergibatterier og høyeffektbatterier i 2023-2030.

Egenskap	Høyenergibatterier	Høyeffektbatterier	Kommentar
Energitetthet pakkenivå [Wh/kg]	85	45	Konservativ verdi i 2023. Kilde: NULLFIB2 [15]
Energitetthet pakkenivå forbedring i prosent mot 2030 sammenlignet med 2023	47 %	55 %	
Volumetrisk energitetthet pakkenivå [Wh/l]	100	50	Kilde: skanning av markedet for leverandører av batterisystem
C- og D-verdi	1-2	Opptil 5	Kilde: skanning av markedet for leverandører av batterisystem
Pris systemnivå [EUR/kWh]	650	1500	Kilde: NULLFIB2 [15]
Levetid (sykluser)	Opp til 8000 sykluser ved 80% DoD. De fleste batterier av denne typen er mellom 2000-4000 sykluser.	20 000	Kilde: skanning av markedet for leverandører av batterisystem
Arbeidsområde	Typisk 20-80%	Typisk 5-95%. Mulig med opptil 100% DoD.	

For å gi tilgjengelig energi til framdrift og andre funksjoner på 800 kWh (eksempel på batteristørrelse som er lagt til grunn for regiontoget i denne utredningen) til kjøretøyet så vil det kreves et høyenergibatteri med minst 1200 kWh installert energimengde (med aldringsreserve på omtrent 200 kWh og hensyntatt 80% DoD), noe som gir en totalvekt på 14,1 tonn. Prisen på et slikt batteri vil være i størrelsesorden 780 000 euro. For et høyeffektbatteri vil det kreves omtrent 1000 kWh (med aldringsreserve på omtrent 100 kWh), noe som gir en totalvekt på 22,2 tonn. Prisen for et slikt batteri vil være i størrelsesorden 1 500 000 euro.

Det er bekreftet gjennom RFI og offentlig informasjon at det er høyeffektbatterier som er den mest brukte kjemien for jernbanekjøretøy. Høyeffektbatterier er generelt sikrere og tåler raskere opp- og utlading. De tåler også bruk av en større del av batteriets totale energimengde sammenlignet med høyenergibatterier. Høyeffektbatteriernes høyere sikkerhet er også noe som vil bli vurdert høyt for bruk innenfor jernbane.

#### *Utvikling fremover*

Det forventes at utviklingen fremover fortsatt domineres av det som skjer innenfor veitrafikk, men det forventes også at dersom kommende prosjekter med batteridrift på jernbanen blir testet i løpet av de neste 2-3 årene, så vil man få en bredere erfaring fra drift av jernbanekjøretøy med batterier til fremdrift. Det forventes da at teknologien vil få fotfeste som en velutprøvd teknologi for forskjellige miljøer og klima.

Endringer i batterikjemien som benyttes kan påvirke ytelsen til alle vesentlige parameter ved et batteri, herunder energitetthet, vekt, volum, energimengde, ladehastighet, utladingshastighet, levetid, sikkerhet, miljøavtrykk og pris. Til tross for at endringer i batterikjemi er varslet, er det som med alle andre tekniske fremskritt vanskelig å gi et eksakt tidspunkt og en eksakt rekkefølge for endringene. Det er også vanskelig å skille mellom mulig teknologi, prototyper og kommersielt tilgjengelig teknologi i markedet. Etterspørselen etter forbedringer i batteriteknologi er svært stor, og det er store gevinster for de som driver utvikling. Dette indikerer at det er grunn til å forvente at utviklingen av batterikjemi fortsetter i høyt tempo.

En konservativ antagelse er at mot 2030 vil energitettheten for batteripakker til jernbanekjøretøy utvikles mot 125 Wh/kg for høyenergibatterier (47% økning relativt 2023) og 70 Wh/kg (55% økning relativt 2023) for høyeffektbatterier. For energitetthet med henblikk på volum er et konservativt anslag at det for både høyenergi- og høyeffektbatterier vil bli en 100% forbedring relativt 2023, så at det går fra 100 til 200 Wh/l for høyenergi og fra 50 til 100 Wh/l for høyeffekt [15]. Prisen for høyenergi- og høyeffektpakker i 2030 er, basert på NULLFIB2 delrapport 1 og funn fra RFI i denne utredningen, antatt å være 10% - 50% lavere enn dagens prisnivå (hvor det øvre delen av spennet er for høyenergi- og det lavere for høyeffektbatterier).

Den historiske utviklingen, og dagens voksende etterspørsel, gir grunn til å anta at det vil bli en større utbredelse av batteriteknologi også i fremtiden. Produktutviklingen er markedsmotivert, og nyutviklede batterier vil først og fremst finnes i de største markedene. I denne sammenheng er jernbanen et lite marked som vil ligge i etterkant av andre større markeder, som for eksempel biler og busser. En forventet effekt av dette er at nyvinning og utvikling i markeder med store volumer relativt raskt vil kunne overføres til mer marginale markeder, som for eksempel jernbane.

#### *Konklusjon*

Det finnes batteripakker for jernbanekjøretøy på markedet, og de tilbys av flere leverandører. Den teknologiske modenheten for slike batterier er høy. Det vil være mulig å anskaffe forskjellige typer batterikjemier, og kjøretøyleverandørene vil gjøre avveininger mellom kostnad, rekkevidde, sikkerhet etc. for å kunne levere det beste produktet til den beste prisen, og samtidig oppfylle alle krav til sikkerhet.

Fremtidig batteriutvikling er ikke avgjørende for at konseptet med batteri for fremdrift av tog skal være mulig, men den vil bidra til lavere pris på batteripakker, og at det vil bli mulig å få inn mer energikapasitet med samme volum og vekt. Dette vil påvirke kjøretøyets rekkevidde, batteriets levetid og hvilket konsept for integrering av batteriene i kjøretøyet som er gunstig å bruke. Dette utdypes i påfølgende kapittel.

#### **8.5.2 Batteriteknologi for motorvogner (persontog)**

Motorvogner med batterier for fremdrift kan betraktes som kommersielt tilgjengelige, men med noe variasjon i modenhet avhengig av hvor stort motorvognsett som vurderes.

Det er et økende antall bestillinger på hybride batteri-kontaktledning motorvognsett til ulike trafikopplegg og prøveprosjekter i Europa, der lengden på kjøretøyene er omtrent 2-4 vogner. Det er vurdert at den



teknologiske modenheten for korte og mellomlange motorvognsett er på TRL-nivå 8/9. Dvs. at teknologien er å anse som moden, men ikke prøvd ut eller tatt i bruk for norske forhold. Det selges flere hybride motorvognsett med batteri-kontaktledning sammenlignet med hydrogen-kontaktledning. Ulike leverandører har ulike løsninger for plassering av batterier i tog, og hva som trekkes frem av leverandørene har en tydelig sammenheng med hvilken løsning de har utviklet lengst, og hvordan den spesifikke kjøretøyleverandøren velger å plassere utstyr i toget (f.eks. på tak, under gulv eller i maskinrom). Figuren under illustrerer mulig plassering av batterier i persontog. De ulike batteriplasseringene gir litt ulike utfordringer eller begrensninger. Noen løsninger har volumbegrensninger, noen har utfordringer med vekt og tyngdepunkt. Felles for alle løsningene er imidlertid at det er utfordringer som lar seg løse i dag, med dagens batteriteknologi.

Lengre motorvognsett, f.eks. et motorvognsett som tilsvarer det som vil bli brukt som fjerntog i Norge (opptil 8 vogner), er per dags dato ikke testet med batteridrift. Togene er imidlertid ikke teknologisk annerledes enn de kortere settene, og det er grunnlag for å tro at batterier vil kunne fungere på samme måte også for disse. Forskjellene i forhold til de kortere motorvognsettene, som er av betydning for løsningen, er lengden og vekten på togene. Forenklet kan det sies at energibehovet vil være opptil dobbelt så høyt for et dobbelt så langt og tungt passasjertog med ellers samme togegenskaper. I denne utredningen er det vurdert at det vil være mulig å skalere batterikapasiteten i forhold til vekt med utgangspunkt i det som er mulig for et 2-4 vogners motorvognsett, slik at den samme energimengden i forhold til vekt vil være mulig også for lengre og tyngre tog. Samtidig vil det kanskje påvirke hvordan batteriene kan plasseres i toget. Det er vurdert at lange motorvognsett som kan brukes i fjerntogtilbudet har et teknologisk modenhetsnivå på TRL 6.



Figur 29: Eksempel på plassering av batteri på et togvognsett motorvognsett.

#### Vekt og volum for batteripakke

For hybrid batteri-kontaktledning motorvogner er konseptet med batterier mer utviklet enn for store godslokomotiver, og det er bekreftet fra leverandører at den energimengden som er lagt til grunn i dette arbeid er langt under hva som er teknologisk mulig med bruk av høyenergibatterier. Utviklingen av store hybride batteri-kontaktledning kjøretøy påvirker i hovedsak hvor lang den mulige rekkevidden vil være for batteridrift. Størrelsen på batteriene i de kjøretøy som er markedsført avhenger også i sin tur av hva markedet etterspør. Dersom det etterspørres større motorvogner og batterikapasitet så vil det også styre de tilgjengelige produktene i markedet.

I NULLFIB2 ble det konkludert med at for et tre-vogners motorvognsett, tilsvarende et regiontog i distrikt, er det rimelig å anta 12 kubikkmeter volum og 12 tonn vekt tilgjengelig for batterisystemet. Dette vil da fungere for både høyenergibatterier og høyeffektbatterier, se Tabell 17. En skalering av tre-vognerstoget indikerer at det også vil være mulig med de foreslåtte batterikapasitetene for de andre persontogene. Det er også bekreftet fra offentlig informasjon om produkter som tilbys i markedet at antagelsen om forholdet mellom togets vekt, togets lengde og energimengde i batteriene er rimelig. Tabell 28 viser batterikapasitet, vekt og volum for høyenergibatterier og høyeffektbatterier til bruk i persontog.

Tabell 28: Batterikapasitet, vekt og volum for høyenergibatterier og høyeffektbatterier til bruk i persontog for 2023.

Kjøretøytype	Mal-tog	Lengde	Forutsatt batterikapasitet	Vekt og volum gitt høyenergibatterier	Vekt og volum gitt høyeffektbatterier
Regiontog i distrikt	RD002	55 m	400 kWh	4,7 tonn 4 m <sup>3</sup>	8,9 tonn 8 m <sup>3</sup>

Regiontog	R004	110 m	800 kWh	9,4 tonn 8 m <sup>3</sup>	17,8 tonn 16 m <sup>3</sup>
Fjerntog	FJ002	165 m	1300 kWh	15,3 tonn 13 m <sup>3</sup>	28,9 tonn 26 m <sup>3</sup>

Ved en 47-55 % forbedring av energitetthet vil opplyst vekt og volum reduseres tilsvarende i 2030.

#### *RFI – Request for information*

Det er utført en RFI i denne utredningen for å undersøke hva ulike leverandører av kjøretøy mener er den teknologiske modenheten i dag og for definerte tidshorisonter i fremtiden. I tillegg er det gjort en RFI i NULLFIB1 for å svare ut spørsmål knyttet til batterier på jernbanekjøretøy.

For korte motorvognsett, tilsvarende regiontog i distrikt beskrevet som 80 meter motorvognsett i RFI, så er det bekreftet at en energimengde på 400 kWh er fullt mulig. Noen leverandører mener videre at en energimengde langt over 1000 kWh er mulig. Det finnes leverandører som mener at dette kan integreres i kjøretøyet uten å kreve plass som ellers vil gå til passasjerer. Andre mener at det kan bli behov for en mellomvogn, noe som innebærer at noe av togets lengde blir brukt til annet enn plass for passasjerer. TRL-nivå er fra leverandører vurdert å være minst 8 per 2023 og 9 per 2030.

For lengre motorvognsett, herunder regiontog og fjerntog, finnes det leverandører som mener at det er mulig med en energimengde som langt overskrider 1300 kWh. TRL-nivået for lengre motorvognsett er fra leverandører ikke svart ut tydelig.

#### *Utvikling fremover*

Det forventes en stadig økning i etterspørselen etter motorvogner med batteripakker i takt med strengere krav til klimapåvirkning og forbedret batteriteknologi, samtidig som konseptet blir mer utprøvd i Europa. Forbedret batteriteknologi vil sannsynligvis gjøre konseptet mer kostnadseffektivt samtidig som det vil bli mulig mer større energimengder installert i kjøretøyet.

Som beskrevet i kapittel 8.5.1 så er et konservativt anslag at energitettheten med henblikk på volum og vekt vil øke med omtrent 50% fra 2023 til 2030. Utover at det er vurdert at batteristørrelsene er mulige med dagens teknologi, så vil et konservativt anslag for utviklingen styrke at de batteristørrelser som er lagt til grunn for persontogene i batterikonseptet har høy grad av gjennomførbarhet.

#### *Konklusjon*

Med bakgrunn i dette er det vurdert at hybride batteri-kontaktledning motorvognsett for fremdrift er kommersielt tilgjengelige, og det finnes forskjellige løsninger for integrering av batteriene i kjøretøyet. Valg av batterikjemi vil ha betydning for volum og vekt for batteriene og dermed påvirke rekkevidden for kjøretøyet på ikke-elektrifiserte strekninger.

På en TRL-skala så vurderes det at TRL-nivået for motorvogner for kortere tog av typen regiontog, og regiontog i distrikt ca. 55 meter lange, er 8/9 per 2023, og at det vil være 9 i 2030. For motorvognsett som skal brukes som fjerntog (220 meter lange) vurderes TRL-nivået til å være 6 i 2023.

Det er vurdert at forskjellen mellom det klimaet og miljøet som denne løsningen er mest utprøvd i, og det klimaet og miljøet som er aktuell i Norge, sannsynligvis ikke påvirker den teknologiske modenheten for konseptet. Det som vil påvirkes av norske forhold er rekkevidden på kjøretøyene, fordi mer energi vil bli brukt til fremdrift og hjelpeutstyr og til eventuell varme for batteripakken. For norske forhold stilles krav om at kjøretøy fungerer i temperatur ned til -40°C.

### **8.5.3 Batteriteknologi for lokomotiver for gods- og persontog**

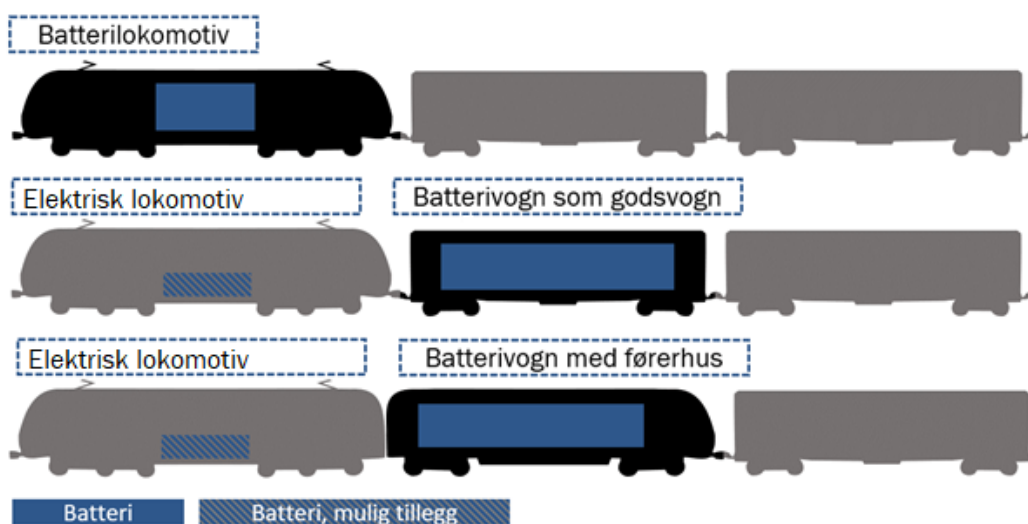
Det er to løsninger for plassering av batterier i batteridrevne lokomotiver. Den ene løsningen innebærer en integrering av batteripakkene i selve lokomotivet, og den andre innebærer en ekstra batterivogn eller energivogn. Et lokomotiv med integrerte batteripakker vil, ifølge flere av kjøretøyprodusentene, måtte være seksakslet, noe som trolig er tilstrekkelig for å trekke persontog. Valg av batterikjemi (se kapittel 8.5.1 om høyenergi- og høyeffektbatterier) vil ha betydning for batterikapasiteten. Som forklart i det følgende vil

godstrafikken sannsynligvis kreve at det er en løsning med batterivogn eller energivogn som benyttes. Det er vurdert at batterilokomotiv har en teknologisk modenhet på TRL-nivå 7, som er noe høyere enn for hydrogenlokomotiver. Det er også noe høyere enn for batterivogner, som har et anslått TRL-nivå på 6. Batterivogner utdypes i det følgende.

For godstrafikk på Norges ikke-elektrifiserte jernbanestrekninger vil det for de fleste godstogslinjene sannsynligvis være behov for en batterivogn. Dette gjør det mulig å betjene en hensiktsmessig fordeling av ladestrekninger også for de tyngste godstogene, som vil kreve en større mengde energi enn persontog trukket av lokomotiv. Utformingen av batterivognen kan videre inndeles i to løsninger. Den ene løsningen innebærer at batterivognen prinsipielt ser ut som et lokomotiv med et eget førerhus i den ene enden, for å kunne gi en delvis permanent formasjon med lokomotivet uten å trenge skifting av batterivognen relativt til lokomotivet. Den andre løsningen er en godsvogn utstyrt med en container med batteripakker. De ulike løsningene for batteridrevne lokomotiver er vist i Figur 29. Det er forutsatt i denne utredningen at batterivognen vil gå i permanent formasjon med lokomotivet, noe som også krever at løpeutstyret på en slik vogn er det samme som i et persontog (men uten driving på akslene) på grunn av krav til arbeidsmiljø. Denne type løpeutstyr har større vekt, noe som reduserer mulig vekt for batterisystemet noe. Årsaken til at batterivognen må gå i permanent formasjon med lokomotivet er at det ellers vil kreve skifting av lokomotivet relativt batterivognen og fra-/tilkobling av høyspenningskabler mellom vogn og lokomotiv ved en slik operasjon. Dette er ikke gunstig sett fra operatørens perspektiv, og vil være en forverring av skifteoperasjonen relativt dagens dieselskjøretøy.

Det skal nevnes at konseptet med bruk av diesel hjelpestrøm-vogn (en variant av en energivogn) ikke er nytt for Norge. Per dags dato blir det brukt såkalte finkevogner for fjerntogene som går på Nordlandsbanen (modell Fde<sup>21</sup>, trukket av lokomotiver av typen Di4). Disse består av dieselaggregat i containere på en godsvogn, som forsyner personvognene med energi til hjelpekraft, noe lokomotivet ikke har tilstrekkelig effekt for å gjøre under kalde forhold. Disse brukes altså ikke for energi til fremdrift. Prinsippet er imidlertid det samme som for konseptet med batterivogn (uten førerhus), hvor den kobles inn i de gjennomgående elektriske kablene i toget som forsyner vognene med elektrisitet.

Figur 22 viser konseptene med batterilokomotiv og lokomotiv i kombinasjon med batterivogn, med og uten førerhus.



Figur 30: Eksempel på plasseringer av batteripakker for lokomotivdrevne kjøretøy.

#### Vekt og volum for batteripakke

I NULLFIB2 delrapport 1 ble det foreslått hvilke vekt og volum som vil være mulig for forskjellige batteriløsninger, og verdiene knyttet til energidensitet og pris tar utgangspunkt i funnene fra NULLFIB2 delrapport 1.

<sup>21</sup> Ytelse på 580 kW, 14m lengde over bufferter, vekt på 39 tonn, 4 aksler, tillatt hastighet 120 km/t.

For en løsning med batterivogn med førerhus, og med løpeutstyr tilsvarende lokomotiv uten drivutstyr, vil det være mulig med opptil 40 tonn dedikert for hele batterisystemet (med aksellast 20 tonn og antatt fire aksler er mulig totalvekt 80 tonn for hele vognen). Som referanse vil en 40 fots container med løpeutstyr som en godsvogn gi mulighet for omtrent 60 tonn batterivekt.

Som resultat av energisimuleringene foretatt i KVV GREEN er det foreslått en energimengde på 2600 kWh for godslokomotiver. Med en energitetthet per vekt på 125 Wh/kg for høyenergi og 70 Wh/kg for høyeffekt, så vil det for høyenergibatterier være mulig med 2600 kWh i en batterivogn med førerhus med omtrent 21 tonn batterivekt. Høyeffektbatterier av samme størrelse vil også kunne klare kravet til vekt med en slik løsning med omtrent 37 tonn batterivekt. Dette forutsetter en konservativ utvikling mot 2030. Dersom det ikke skjer noen utvikling fra de konservative verdiene antatt for 2023 vil høyenergibatterier kunne fungere for konseptet med fireakslet energivogn med førerhus. For høyeffektbatterier vil det kreves en fireakslet godsvogn uten førerhus, eller en seksakslet vogn med førerhus, der de to ekstra akslene vil gi mulighet for minst 20 tonn totalt i ekstra last. Dette sikrer også maksimalt 20,5 tonn aksellast, noe som er viktig i henhold til overbygningssklassen.

Volumet for en standard 40 fots container er omtrent 67 kubikkmeter. Med en energitetthet per volum på omtrent 100 Wh/l for høyenergi og 50<sup>22</sup> Wh/l for høyeffekt per 2023, så vil batterienes volum gitt 2600 kWh være henholdsvis 26 kubikkmeter og 52 kubikkmeter, og vil dermed ikke utgjøre noen utfordring. For konseptet med førerrom på en fireakslet vogn vil tilgjengelig volum være omtrent 35 kubikkmeter. Dette vil fungere for høyenergibatterier på 2600 kWh. Men for høyeffektbatterier vil det kreves ytterligere 15 kubikkmeter gitt 2600 kWh og energitetthet på 50 Wh/l.

Det forventes at kombinasjonen av batteriutvikling (50% økning av energitetthet med henblikk på vekt og 100% med henblikk på volum mellom 2023 og 2030, se kapittel 8.5.1), og muligheten for å bruke en seksakslet vogn med noe større volum<sup>23</sup>, vil gjøre det mulig å få plass til 2600 kWh i en batterivogn med tilgjengelig volum på 35 kubikkmeter. F.eks. vil en slik utvikling med 100% økt energitetthet (volum) minke høyeffektbatteriets volum fra 52 kubikkmeter til 26 kubikkmeter, noe som indikerer at det kan bli mulig med høyeffektbatterier for en fireakslet vogn med førerhus grunnet den konservative utviklingen. Det vil være mulig også hvis utviklingen går fra 50 Wh/l til omtrent 74 Wh/l for høyeffektbatterier, en 48% økning mellom 2023 og 2030. For 50% økning i energitetthet med henblikk på vekt vil batteripakkevekten gå fra 58 tonn til 37 tonn og være innenfor den fireakslete førerhusvognens begrensning på 40 tonn.

Samtidig finnes det mulighet for å plassere noen batterier i lokomotivet, anslagsvis minimum 2000 kWh høyenergibatterier eller omtrent 1000 kWh høyeffektbatterier basert på svar fra RFI. Dette underbygger også at det er rimelig å anta at en slik batterimengde er mulig. Tabell 16 viser batterikapasitet, vekt og volum for høyenergibatterier og høyeffektbatterier til bruk i godstog.

Tabell 29 Tilgjengelig volum og vekt for forskjellige konsepter med integrering av batteripakker for godslokomotiv

Kjøretøytype	Tilgjengelig volum for batterisystem [kubikkmeter]	Tilgjengelig vekt for batterisystem [tonn]	Kilde
Lokomotiv, seksakslet	15-20	12-22	NULLFIB2 [15]
Batterivogn uten førerhus, 4 aksler	67	60	Basert på standard godsvogn
Batterivogn uten førerhus, 6 aksler	100	90	Basert på standard godsvogn

<sup>22</sup> Basert på skanning av markedet for batterier til jernbaneapplikasjoner i 2023.

<sup>23</sup> Det finnes godsvogner som kan håndtere 40+20 fots containere og som har en lengde på straks under 20 meter. Dette vil gi en økning i lastevolum med omtrent 50% fra omtrent 67 til omtrent 100 kubikkmeter. Den prosentuelle økningen for vognen med førerhus for å kunne få inn 2600 kWh er 15/35=43%, noe som styrker at med en seksakslet batterivogn som har en lengde som tilsvarer en godsvogn som tar 40+20 fots containere, så vil energimengden være mulig med hensyn til volum.

Batterivogn med førerhus, 4 aksler	35	40	NULLFIB2 delrapport [15]
Batterivogn med førerhus, 6 aksler	50	60+ tonn	NULLFIB2 [15] med tilleggsinformasjon i denne rapport

Tabell 30 Batterikapasitet, vekt og volum for høyenergibatterier og høyeffektbatterier til bruk i godstog

Kjøretøytype	Forutsatt batterikapasitet	Nødvendig vekt og volum gitt høyenergibatterier	Nødvendig vekt og volum gitt høyeffektbatterier	Kilde
Godstog 1200 tonn	2600 kWh	<u>Per 2023:</u> 30,6 tonn 26 m <sup>3</sup> <u>Konservativ utvikling mot 2030:</u> 21 tonn 13 m <sup>3</sup>	<u>Per 2023:</u> 57,8 tonn 52 m <sup>3</sup> <u>Konservativ utvikling mot 2030:</u> 37 tonn 26 m <sup>3</sup>	NULLFIB2 [15]

#### Elektrisk forsyning til lading av batteripakke

For lading av batteriene i en separat vogn vil det være mulig å enten bruke en kabel til vognen (referert til som batterivogn i dette dokumentet), eller egen strømvaktter, transformator og likeretter for energivognen (referert til som energivogn). I denne utredningen er det lagt til grunn det førstnevnte alternativet, hvor hele vognen, med unntak av førerhuset, brukes til batterier. Det forutsetter også at transformatoren og likeretteren i lokomotivet kan forsyne motorene, hjelpekraftutstyr og batteriene samtidig med den samlede effekten som kreves.

For at dette skal være mulig vil det kreves en tilkobling av batterivognen til lokomotivet. Det kan gjøres på forskjellige måter, f.eks. med en likestrømkabel fra en DC/DC-omformere mellom DC-mellomleddet og batteriets ladeenhet. For å kunne analysere forskjellige løsninger vil det kreves mere informasjon fra kjøretøyprodusenter. Det er i dette arbeid lagt til grunn en løsning der batterivognen kun inneholder batterier og eventuelt tilhørende DC/DC-omformere. Alt annet utstyr mellom batterier og strømvaktter er forutsatt å være plassert i lokomotivet.

#### RFI – Request For Information

Det er utført en RFI i denne utredningen for å undersøke hva ulike leverandører av kjøretøy mener er den teknologiske modenheten i dag og for definerte tidshorisonter i fremtiden. I tillegg er det gjort en RFI i NULLFIB1 for å svare ut spørsmål knyttet til batterier på jernbanekjøretøy.

I RFI fra NULLFIB1 ble det bekreftet at en løsning med batterier integrert i lokomotivet og/eller i en separat batterivogn er teknisk mulig, og at løsningen med batterivogn vil gi større volum og vekt for batterier enn ved kun bruk av lokomotiv. I RFI fra KVVU GREEN er det bekreftet at minst én leverandør kan tilby et elektrisk lokomotiv med energimengde med minimum 2300 kWh (omtrent 20% margin som ikke kan brukes, slik at 1800-1900 kWh kan brukes). Dette er sannsynligvis med høyenergibatterier. Det finnes minst én leverandør som mener at en slik løsning med batterier integrert i lokomotivet har TRL på minimum 6 per 2022 og TRL 9 per 2030. Det er også nevnt i svarene fra RFI-en til KVVU GREEN at en løsning med separat energivogn eller batterivogn er mulig, uten at det er utdypet i svarene. Noen kjøretøysleverandører mener at en slik løsning vil være nødvendig for drift over lengre strekninger og med tyngre tog, mens andre mener at batterier integrert i lokomotivet vil gi tilstrekkelig energimengde. Dette er avhengig av leverandørens utviklede plattformer for kjøretøy.

### *Utvikling fremover*

Godstog med batteripakker store nok for fremdrift som beskrevet i dette konseptet har lavere etterspørsel enn f.eks. motorvognsett, men det finnes eksempler på kjøretøyleverandører som utvikler løsninger for dette for det europeiske markedet. Leverandører som vanligvis leverer til det nordamerikanske markedet har kommet lengst i utviklingen av lokomotiver med store batteripakker.

Energimengden vil begrenses av mulig vekt og volum for batterier i kombinasjon med den energitettheten som den teknologiske utviklingen gjør mulig. Det forventes at forbedret batteriteknologi vil gjøre det lettere å utvikle produkter med batterier for fremdrift av lokomotiver for tyngre tog.

### *Oppsummering*

Det er vurdert at selv om lokomotiver med denne batteristørrelse ikke er like utbredt som motorvognsett med batterier, så finnes det noe få leverandører som har løsninger på slike produkter, og som mener at de kan levere slike teknologiske løsninger. Minst én leverandør har også gjort dette for det nordamerikanske markedet. Med dagens batteriteknologi er det mulig å finne løsninger der lokomotiver benytter batterier for togfremføring for de godstogene som går på de ikke-elektrifiserte strekningene i Norge. Som følge av den noe lavere teknologiske modenheten vil det være høyere utviklingskostnad for disse lokomotivene sammenlignet med motorvognsett. Utvikling av batteriteknologien vil gjøre det lettere å utvikle gode batteribaserte løsninger for lokomotiver til en lavere kostnad.

For høyenergibatterier vil en batterimengde på omtrent 2600 kWh kunne være mulig å integrere i kjøretøyet, forutsatt at dagens energimengde (2300 kWh) utvikles til 2600 kWh i 2030. Dette forutsetter et seksakslet lokomotiv. For høyeffektbatterier vil en slik løsning ikke være mulig, slik at det kreves en separat batterivogn (eller energivogn). Avhengig av en eventuell forbedring av batteriteknologien mot 2030 så kan det kreves at denne batterivognen er seksakslet for at den skal kunne ha et førerhus. Det er uansett lagt til grunn at for den energimengde på 2600 kWh som er antatt for godstogene i denne utredningen så vil det være tilstrekkelig med én batterivogn. En eventuell forbedring av batteriteknologien påvirker om denne kan være fireakslet eller trenger å være seksakslet.

For små lokomotiver med kort rekkevidde så er det kjøretøy i drift og som kan bestilles. Disse er vurdert å ha 9 i 2030. For større hybride batteri-kontaktledning lokomotiver for bruk til godstog og som skal ha lengre rekkevidde så er markedet slike løsninger ikke kommet like langt som for motorvognsett. Det skal nevnes at utenfor Europa finnes slike kjøretøy til bestilling, men det er få prosjekter hvor slike kjøretøy er levert og testet. I NULLFIB2-prosjektet så ble det gjort vurderinger av batterikonseptet for godslokomotiv.

På en TRL-skala så vurderes det at TRL-nivået for store lokomotiver ikke er høyere enn 7 per 2023, og at det vil være 9 i 2030. Dette gjelder for lokomotiver med batterier integrert i selve lokomotivet. For batterivogn så er det ikke bekreftet fra leverandører hva TRL-nivået vil være, og det vurderes at nivået ikke er høyere enn 6 for 2023. Det finnes ikke informasjon som indikerer at en slik løsning etterspørres i markedet, og det anses lite sannsynlig at denne løsningen kan ha det samme TRL-nivået som batterier integrert i lokomotivet for tidshorisontene 2023 og 2030.

#### **8.5.4 Konklusjon**

Med dagens batteriteknologi er det dokumentert at en teknologiovergang til batteridrift er mulig dersom det finnes en infrastruktur for lading. Forskning og utvikling viser at det er et vesentlig potensial for forbedring av batteriegenskaper for jernbanekjøretøy.

Dette medfører at videre utvikling av batteriteknologi ikke er relevant for om en teknologiovergang fra diesel til batteri er mulig, men det vil ha betydning for kostnadsbildet og hvilken robusthet det er mulig å bygge inn i de ulike ruteplaner og driftsopplegg. Det påvirker også hvordan batteriene vil integreres i kjøretøyet, særlig for lokomotiver til godstog.

## **8.6 Samfunnssikkerhet og tilfredstillelse av lover og forskrifter**

### **8.6.1 Sikkerhetsrisiko**

For at implementering av batterier for fremdrift gjennomføres, er det viktig å sikre at både faktisk og opplevd sikkerhet lever opp til de strenge kravene for sikkerhetsnivå man operer med i jernbanen, og den

lave risikoaksept som er knyttet til jernbanevirksomheten. Bruk av store batterier i jernbanen vil som følge av dette være knyttet til noen usikkerheter. Samtidig skal dette ses i sammenheng med andre transportsektorer, f.eks. vei, hvor det er utbredt bruk av relativt store batterier, og som det er vurdert å være stor aksept for.

Det er ikke identifisert regulatoriske barrierer for implementering av batterier i jernbanen i form av eksplisitte forbud eller etterlevelseregelverk som setter krav det er umulig å oppfylle. Det finnes flere europeiske regelverk som regulerer bruk av slike batterier.

Utover regelbaserte krav vil det være risikobaserte krav. Dette medfører at det er vanskelig å forutsi hvis det vil være regulatoriske barrierer som begrenser ibruktage av batterier som energibærere i jernbanen før alle aktører med ansvar for sikkerhet knyttet til driften har gjort de nødvendige risikovurderingene av sin konkrete bruk av teknologien.

To av hovedprinsippene for vurdering av risiko i jernbanen er at endringer som risiko vurderes ikke skal øke risikonivået, og at enhver unødig risiko skal unngås. Bruk av batterier gir noen endrede risikoforhold i jernbanedriften på en måte som vil kreve involvering av alle relevante aktører. Det er vurdert at sannsynligheten for ulykke ikke vil være høyere enn for den løsning det endres fra. Det som vil endres er konsekvensene, og de nødvendige tiltakene sammenlignet med referansealternativet.

Batteridrift av jernbanekjøretøy medfører at det lagres betydelige mengder elektrisk energi i batteriene ombord i kjøretøyene, noe som innebærer en viss risiko. Den største faren knyttet til batteriene er varmeutvikling, som kan utvikle seg til såkalt «thermal runaway». Thermal runaway vil si en selvforsterkende varmereaksjon, som skaper mye varme og farlige gasser, og som i ytterste konsekvens kan medføre brann eller eksplosjon. Brannen vil være vanskelig å slukke som følge av at den delvis finner sted inne i battericellene/modulene. Brannen vil også kunne bidra til oppvarming av omkringliggende celler og moduler, og i verste fall kan brannen spres og resultere i en ukontrollert brann i hele batteripakken.

Det kan være flere årsaker til en slik termisk hendelse, eksempelvis intern eller ekstern kortslutning, overlast, overlading eller ekstern varmepåvirkning. Hvor raskt en slik hendelse utvikler seg, mengden gass som frigjøres og energien en brann vil få, avhenger av batteriets oppbygning, kjemi og ladestatus. I et lukket miljø kan gass som frigjøres ved en termisk hendelse akkumuleres, slik at det under gitte betingelser oppstår en eksplosiv atmosfære. Sikkerhet og beredskap knyttet til tunneler og andre lukkede områder er derfor spesielt aktuelt. For hendelser med batterier i tog utendørs forventes det å være en noe lavere risiko sammenlignet med hendelser i tunneler.

I møte med Drammensregionens brannvesen ble det gjort klart at batterier vurderes som komplisert fra et brannsikkerhetsperspektiv, fordi de gir intense og langvarige branner som er svært vanskelige å slukke. De inneholder i tillegg flere kjemiske stoffer som kan være giftige, og innebærer derfor også stor forurensningsfare. Dette har betydning for vurderingen av behovet for eventuelle beredskapstiltak. Det er også bekreftet fra brannvesenet at bruk av slike batterier i tunneler er en risiko. Brannvesenet bekrefter at ved en slik hendelse med batteribrann, og særlig i tunnel, så vil hovedprinsippet være selv-evakuering, som betyr at mennesker selve må evakuere fra stedet som følge av at det vurderes å utgjøre en for stor risiko å sende inn brannvesenets ressurser.

Samfunnssikkerheten omfatter også sikring mot handlinger som gjøres med intensjon om å skade materielle verdier, liv og helse. Et konsept med batteri har den samme type elektrisk infrastruktur som konvensjonell jernbane som brukes på alle elektrifiserte jernbanestrekninger, og det er derfor vurdert at alternativet ikke innfører noe økt risiko knyttet til terrorhandling i infrastrukturen sammenlignet med jernbanen for øvrig. For kjøretøyene introduseres det en annen type energilagring ombord som overvåkes av ombordsystemer. Batteripakken kan i teorien være formål for forsettlig terrorhandling, men dette må ses opp mot hvor tilgjengelig dette utstyr er og hva slags utstyr som allerede er i bruk i jernbanen. Batteripakken er bygget inn i en beskyttet konstruksjon. Dette kan sammenlignes med dieselskjøretøy, der dieseltanken typisk sitter tilgjengelig under vognkassen. Batteripakker av mindre type er allerede i bruk i Norge, forskjellen blir størrelsen på batteripakken og mengden energi som er lagret. Teknologien er godkjent med henhold til europeiske regelverk i andre europeiske land, og selv om dette ikke er en garanti for utfallet av en godkjenningsprosess i Norge så vurderes det å være lite sannsynlig at batterienes motstandsevne til terrorhandling vil være til last for teknologien.

### **8.6.2 Reduksjon av sannsynlighet**

For batterier med høy effekt, som for eksempel batterier til bruk i jernbanekjøretøy, er det vanlig med luft- eller vannkjølekanaler, pumper eller vifter for å tillate avkjøling med luft eller væske. Det kan også være aktuelt med varmevekslere for varmetilførsel ved bruk i miljøer med spesielt lav temperatur. Utover dette er det viktigste sikkerhetssystemet batteriets BMS (Battery Management System). BMS-en overvåker kontinuerlig at batteriet ikke opererer utenfor sikkert driftsområde, og kan for større systemer kommunisere med en fjernstyrt overvåkingssentral.

Valg av batterikjemi har betydning for sannsynligheten for at det oppstår en batteribrann. Høyeffektbatterier tåler raskere opplading og utlading enn høyenergibatterier. De tåler også at batteriene lades opp høyere, og lades ut lavere enn høyenergibatterier.

### **8.6.3 Reduksjon av konsekvens**

Ved fare for overoppheting eller spenningsfeil i batteriene, vil hele batteripakken stenges ned for å unngå en uønsket hendelse. Et batteridrevet jernbanekjøretøy har normalt flere batteripakker, og ved feil i en batteripakke vil denne kunne isoleres fra de øvrige.

DSB har utarbeidet en veileder for risikovurdering og håndtering av branner i Litium-ion batterier. I denne er det forklart at brann i batterier med den størrelse som er lagt til grunn i dette konsept vil kreve spesiell kompetanse innenfor håndtering av batteribrann. I praksis betyr det at det kan være behov for særlige beredskapstiltak innenfor alle de regionene der batterikjøretøy benyttes. Dette omfatter behov for både kompetanse og utstyr for å håndtere en batteribrann. For tunneler spesielt er den totale beredskapen satt sammen av tiltak i kjøretøyene, tiltak i tunnelen og nærliggende områder, kompetanse hos ombordpersonalet, passasjerene sine evner og muligheter til å rømme på egen hånd og innsatsen fra brann- og redningstjenesten. Dette innebærer at alle aktører, herunder operatører, infrastruktureier/-forvalter og brann- og redningstjenesten må utarbeide solid fundamenterte beredskapsplaner for den aktuelle driftsformen ved en overgang til batterier som energibærer. Beredskapsplanene må være koordinerte mellom aktørene.

Det skal i denne sammenheng nevnes at det finnes allerede utarbeidet strategier for brann. Det som er viktig for denne teknologien er hvorvidt risikoene for brann med batterier må håndteres på en vesentlig annen måte enn for dagens teknologi.

Valg av strategi for å håndtere en brann kan påvirke utslipp og konsekvenser. Eksempelvis kan utslippene, og derav konsekvenser for miljøet, reduseres ved høye branntemperaturer ved å tillate batteriene å brenne ut fremfor å iverksette slukking. Slukkearbeid vil kreve store mengder vann, i størrelsesorden +10 kubikkmeter, og slukkevannet kan ha forhøyet pH og inneholde metaller og elektrolytter. Slukkevannet bør derfor samles opp i så stor grad som mulig. Valg av strategi vil avhenge av størrelsen på batterisystemet, og vurdering av den aktuelle brannen. Selv om batteriet til synes er slukket, så vil en brann kunne starte flere dager etter slukkeinnsatsen. Det finnes aktører, blant annet brannvesenet, som mener at en måte å håndtere dette på er å drukne hele batteripakken. For en slik innsats vil det kreves løftekraner og containere med vann. Dette underbygger behovet for riktig kompetanse og utstyr til å vurdere og håndtere aktuelle scenarioer.

### **8.6.4 Tilfredstillelse av lover og forskrifter**

Konseptet må tilfredsstill minimumskrav i gjeldende norsk og europeisk regelverk for å ivareta sikkerheten på jernbanen. Regelverket omfatter i prinsippet «etterlevelseskra» og «risikovurderingskrav». Etterlevelseskra består i prinsippet av konkrete eller funksjonelle tekniske krav til funksjon, prosesser og metoder i tilknytning til utvikling og bygging. Det dokumenteres og verifiseres at etterlevelseskraene er fulgt. «Etterlevelseskra» er godt egnet for å ivareta sikkerhet, men har en svakhet ved innføring av ny teknologi og nye metoder der det ikke er utviklet dekkende krav. For en driftsform med bruk av batterier finnes i dag flere standarder som er spesielt utviklet for jernbanekjøretøy med batteridrift. De mest aktuelle er IEC 62864-1, som håndterer hybridssystemer med energilagring om bord, og IEC 62928, som håndterer bruk av litium-ion batterier til fremdrift av jernbanekjøretøy.



Utover dette finnes TSI<sup>24</sup> Safety in Railway Tunnels som regulerer sikkerheten knyttet til tunneler. I dette regelverk er det utarbeidet tiltak som kan forebygge og begrense vanskelighetene ved rømming eller redningsaksjoner etter en tunnelspesifikk jernbaneulykke, og foreslår relevante tiltak som gir kontroll over og/eller svært reduserer risikoene ved slike tunnelulykker. Det skal nevnes at den TSI-en kun er aktuell for nye, fornyede eller oppgraderte tunneler (fra det dato som TSI-en ble gjeldende) og som er lengere enn 100m. TSI-en krever altså ikke noen endringer på systemer som allerede er i bruk, mot forutsetning at de ikke bygges om eller fornyes. Det er usikkert hvorvidt noen av tiltakene for tunnelene for dette konsept vil vurderes som en fornyelse eller oppgradering. Det som vil være aktuelt å vurdere er hvis installasjon av kontaktledning i taket og frostsikring<sup>25</sup> av tunnelen vil kunne anses å være en oppgradering eller fornyelse av tunnelen.

Med det sagt, så er den delen av regelverket som går på kjøretøy gjeldende ved anskaffelse av nye kjøretøy. Det skal også nevnes at det i denne TSI tydelig fremgår at det kan kreves flere tiltak enn hva som er angitt i TSI-en for å oppnå et ønsket nivå på tunnelsikkerhet, men at slike tiltak kun gjelder for infrastruktur, energiforsyning, drift og trafikkstyring.

Selv om regelverket altså ikke nødvendigvis er obligatorisk for tunnelene i denne sammenheng så finnes det deler av regelverket som sier noe om hva som kan anses være gode tiltak for å redusere risiko. Et utvalg av disse er presentert i det følgende. For tunneler lengre enn 1 km kreves det at det finnes en sikker plass i tunnelen som gir beskyttelse mot livstruende farer inntil en fullstendig rømning til en sikker plass kan verkstilles. Det skal utarbeides en redningsplan for hver tunnel (over 1 km i lengde) under ledning av infrastrukturforvalter i samarbeid med brannvesenet og berørte myndigheter, og jernbaneorganisasjoner som skal bruke tunnelen skal være involverte. Denne plan skal være utformet med hensyn til mulighetene for selvevaluering, rømning, brannslukking og redningsaksjoner som er mulige. Det skal også utarbeides tunnelspesifikke ulykkes scenarier som er tilpasset de lokale tunnelforholdene.

For kjøretøyene er regelverket aktuelt. For alle tunneler (uansett lengde) skal kjøretøyet overvåkes slik at toget ikke kjører inn i tunnelen med en kjent feil som påvirker kjøreegenskapene. Hvis det skjer en ulykke inne i tunnelen så skal toget (dersom det er mulig) kjøre ut ur tunnelen eller til neste evakueringspunkt for brannslukking. Det skal noteres at anvendelsen av denne TSI-en på arbeidsmaskiner er frivillig.

For «risikovurderingskrav» ligger vurdering og evaluering av risiko til grunn for å ivareta og utvikle sikkerhetsnivået. Kravet om risikovurdering gjelder i all hovedsak når det inntreffer endringer fra dagens situasjon i teknikk, operasjon eller organisasjon. Det er operatør som har ansvaret for gjennomføring av risikovurderinger, men for batteridrift vil det også være et grensesnitt mot infrastrukturen knyttet til eksempelvis ladestrekninger, batterikapasitet, brann- og eksplosjonssikkerhet etc. Det finnes i dag jernbanekjøretøy som benytter ordinært kontaktledningsanlegg og batterier for fremdrift, som er testet og godkjent av tilsynsmyndigheter i andre europeiske land. Dette gir en indikasjon på at sikkerhet og tilfredsstillende av lover og forskrifter ved batteridrift er akseptabel, men innebærer ikke automatisk at kjøretøyene passer for de betingelsene som gjelder for jernbanen i Norge. Ved innføring av batteridrift vil det være aktuelt å gjennomføre risikovurderinger for driftsformen hos de relevante aktørene for å sikre et akseptabelt risikonivå i norsk kontekst. Det er operatørene på jernbanene som har det totale ansvaret for sikkerheten, og operatørene gjør egne sikkerhetsvurderinger. En uønsket hendelse kan føre til at operatøren mister sikkerhetssertifikatet eller lisens, og rettighetene til å fremføre tog. Det må derfor være opp til operatørene om de ønsker å benytte batterier som energibærere. Det er vanskelig å forutsi på dette stadiet hva som vil være utfallet fra en slik risikovurdering.

Fremtidig utvikling innenfor batteriteknikk kan påvirke vurderingen av sikkerhet for batterier. Et område hvor teknologiutvikling vill kunne ha stor betydning er batterikjemi, og hvor det særlig er forskningen på «solid-state» batterier (faststoff batterier) som vil kunne ha en stor positiv innvirkning på sikkerhetsvurderingen knyttet til batterier. Disse batterityper vil ha svært høy sikkerhet. Det er imidlertid uklart når, og til hvilken grad, slik teknologi vil tas i bruk og bli utbredt og tilgjengelig for jernbaneapplikasjoner.

---

<sup>24</sup> Technical Specifications for Interoperability er et felles europeisk regelverk som stiller grunnleggende krav til jernbanesystemet for homologering i Europa

<sup>25</sup> Vann som siver gjennom overliggende berg, kan gi overslag på kontaktledningen.

### 8.6.5 3R-vurdering

Med hensyn til robusthet, redundans og restitusjon (se nærmere forklaring av metode og hensikt i kapittel 6.6.9), er vurderingene for konsept 3 batteri som følger:

#### *Vurdering av robusthet*

Batterikonseptet vil medføre endrede forutsetninger i transportsektorens evne til å tåle ekstraordinære belastninger. Med batterier som energilagring ombord kjøretøyene så vil kjøretøyene ha mulighet å forflytte seg en begrenset strekning uavhengig av forstyrrelser i den elektriske infrastrukturen. Dette gir en økt robusthet mot forstyrrelser i den elektriske infrastrukturen. Det betyr ikke at det vil være en fullverdig løsning mot slike forstyrrelser, men det vil øke muligheten å forflytte seg til en annen strekning hvor batteriet kan lade, eller hvor passasjerer kan bli forflyttet til et annet kjøretøy og hvor kjøretøyet kan tas ur trafikk. Dette kan sammenlignes med et system hvor et bortfall av energimatingen resulterer i stopp på linjen. Sammenlignet med alternativ 0 vil robustheten mellom infrastruktur og kjøretøy være noe lavere, fordi alternativ 0 kun er avhengig av tankstasjoner. I denne sammenheng er det også nødvendig å se på sannsynlighet for forstyrrelser i energimating og omborddrivsystem sammen, og som sannsynligvis vil gi et annet bilde sammenlignet med alternativ 0.

Ved konvensjonell elektrifisering blir kontaktledningsanlegget utformet slik at tilstøtende omformerstasjoner kan støtte hverandre. Det betyr at ved bortfall av en omformerstasjon så kan kjøretøyene ofte passere strekningen, men med hastighetsreduksjoner. Denne innbygde robusthet vil ikke være tilfellet med del-elektrifisering, fordi de del-elektrifiserte strekningene ikke vil være elektrisk sammenkoblede mellom omformerstasjoner. En annen risiko er nedrevet kontaktledning, som i sammenhengen har større sannsynlighet enn bortfall av en omformerstasjon. Ved en slik hendelse vil det være begrensede muligheter for kjøretøyet å kunne fortsette turen, men sammenlignet med elektrifisering (alternativ 4) vil det finnes en begrenset energi ombord for varme, ventilasjon og kjøling.

Ved ulykker på linjen som resulterer i stopp i trafikken (og at togene ikke har tillatelse å kjøre), så vil et slikt stopp være ugunstig for et batteridrevet kjøretøy dersom det stopper på en ikke-elektrifisert strekning. Dette er fordi toget har en begrenset mengde energi for varme, ventilasjon og kjøling, som i sin tur kan påvirke passasjerene negativt sammenlignet med diesel. Sammenlignet med elektrifisering (alternativ 4) så vil det uansett være en ulempe at det blir forstyrrelser i energimatingen.

Oppsummert er det noen fordeler og ulemper med hensyn til robusthet for batterikonseptet sammenlignet med alternativ 0. Oppetiden for dette alternativet, som er en måleenhet for å vurdere graden av robusthet, er vurdert å være på minst samme nivå som alternativ 0 hvis det inkluderes kjøretøy og infrastruktur. Hvis det kun vurderes med hensyn til infrastruktur så er robustheten noe lavere fordi konseptet introduserer ekstra system og kompleksitet (som har en feilfrekvens og oppetid) i energiforsyningen.

#### *Vurdering av redundans*

Redundansen er kun vurdert å endres dersom transporten får andre alternative fremføringsveier. I denne sammenheng vil det kun bli en økning i redundans dersom jernbanetransport kan gå på alternative veier. For Solørbanen, som er foreslått å bli hel-elektrifisert, så vil den banestrekningen utgjøre en redundant transportkorridor mellom Kongsvinger-Elverum-Hamar sett sammen med korridoren via Kongsvinger-Lillestrøm-Hamar (Dovrebanen opp fra Lillestrøm). For øvrige ikke-elektrifiserte strekninger vil ikke redundansen endres sammenlignet med alternativ 0. Dette er fordi togene som går på Dovrebanen (som kunne vært en redundant korridor med Rørosbanen) ikke vil være tilpasset batteridrift på Rørosbanen.

#### *Vurdering av restitusjon*

Batterikonseptet medfører økt mengde infrastruktur og kompleksitet der kjøretøyenes energiforsyning blir avhengig av den konkrete infrastrukturen. Den økte mengden infrastruktur, som i denne sammenheng hovedsakelig er kontaktledningsanlegg, gir at det ved en hendelse som påvirker infrastrukturen og stopper togtrafikken (f.eks. et ras eller en avsporing) så vil det kunne kreves lengre tid for å gjenopprette jernbanens transportevne. Det kreves derfor mer for å sette jernbanen tilbake i drift igjen etter en uønsket hendelse sammenlignet med alternativ 0, men dette avhenger av typen forstyrrelser.

### 8.6.6 Tilpasning av verksteder

Verksteder som skal håndtere kjøretøy med store batterier vil sannsynligvis ha behov for å gjennomføre tiltak for at risikovurderinger utført av de som er ansvarlige for sikkerheten i verkstedene skal konkludere med en tilstrekkelig lav og akseptabel risiko. Som nevnt i kapittel 8.6.1 er det hovedsakelig brann, og i denne sammenheng i batteriene, som er aktuelt å drøfte. Det finnes allerede planer og sikkerhetstiltak for brann i verksteder, men batteribrann vil være noe annerledes som sannsynligvis vil kreve særlige tiltak.

Ved en batteribrann vil den sannsynligvis genereres gasser som er eksplosive og som er en fare for helse. Brannen starter typisk med at batteriet produserer store mengder røyk, hvor denne røyk inneholder disse farlige gassene som vil kunne antennes. Verkstedet bør derfor kunne ventileres ved slike hendelser.

Som drøftet i kapittel 8.6.1 så er batteribrann vanskelig å slukke, og i noen sammenhenger vil det kunne vurderes å la batteriet brenne ut. For å redusere skadepotensialet for selve verkstedet (materielle verdier) så bør berørte aktører, herunder blant annet vedlikeholds ansvarlig og brannvernet, ha rutiner, utstyr og trening i hvordan en batteribrann skal håndteres. Det vil f.eks. kunne vurderes å ha rutiner for å trekke ut et brennende kjøretøy i fri luft slik at brannen i kjøretøyet ikke brenner ned verkstedet. Det er uklart hvordan dette vil realiseres i praksis (for å f.eks. deaktivere bremsene for forflytning), fordi et brennende kjøretøy sannsynligvis vil kreve umiddelbar evakuering fra sin nærhet.

Materialvalget i tak og vegger på verkstedet vil kunne kreve tilpasning slik at høy varme fra en batteribrann gir minst mulig spredningsrisiko og strukturelle skader på verkstedet. For å redusere sannsynligheten for en slik brann bør kjøretøyenes systemer for batteri- og temperaturovervåking, og kjøretøyenes brannalarm, kommunisere med verkstedets alarmsystem. For å kunne håndtere konsekvensene fra en batteribrann som har forårsaket store materielle skader vil det sannsynligvis kreves forsikringer som dekker brann som oppstår i kjøretøy.

Det vil for hvert enkelt verksted kreves at det vurderes de tiltak som vil være nødvendige for å sikre et akseptabelt risikonivå, og hvor dette kapittel har drøftet noe av de viktigste temaer som vil være aktuelt for en slik analyse.

### 8.6.7 Oppsummering

Den største risikoen knyttet til batteridrift på jernbanen er ansett å være «thermal runaway» som kan medføre brann eller eksplosjon i tunnel. For å redusere sannsynligheten for dette produseres batterier med luft- og kjølesystemer, samt at batteriene overvåkes av BMS for å se til at batteriene opererer innenfor sikkert driftsområde. Valg av batterikjemi vil sannsynligvis også ha betydning, og høyeffektbatterier har høyere grad av sikkerhet enn høyenergibatterier. Det er også høyeffektbatterier som er lagt til grunn i denne utredningen.

Det finnes i dag standarder som er spesielt utviklet for jernbanekjøretøy med batteridrift. Det finnes også jernbanekjøretøy, som benytter ordinært kontaktledningsanlegg og batterier for fremdrift, som er testet og godkjent av tilsynsmyndigheter i andre europeiske land. Dette gir en indikasjon på at sikkerhet og tilfredsstillende av lover og forskrifter ved batteridrift er akseptabel, men innebærer ikke automatisk at kjøretøyene passer for de betingelsene som gjelder for jernbanen i Norge. Innføring av konseptet vil innebære risikovurderinger og utarbeidelse av beredskapsplaner og beredskap for den aktuelle driftsformen i norsk kontekst. Sett opp mot referansealternativet er det på dette detaljnivået ikke funnet grunnlag for at konseptet gir unødig eller uakseptabel økning av sårbarheten i forhold til opprettholdelse av jernbanens samfunnsfunksjon, eller vesentlig økt risiko for storulykke.

Løsningen må tilfredsstillende de regelbaserte kravene og risikobaserte kravene. Løsningen ser ut til å kunne tilfredsstillende regelbaserte minimumskrav i norsk og europeisk regelverk, og ved anskaffelse og driftsettelse av nye jernbanekjøretøy med batterier for fremdrift så vil de regelbaserte kravene være ivarettatt av de nødvendige anskaffelses- og godkjenningsprosessene for å få slike kjøretøy godkjent for drift. Det er ikke funnet grunnlag for at konseptet ikke skal kunne være akseptabelt for driftssikkerhet, arbeidsmiljø og ytre miljø, men det er vanskelig å forutsi hvis det vil være risikobaserte barrierer som begrenser ibrukttagelse av batterier som energibærer i jernbanen før alle aktører med ansvar for sikkerhet knyttet til driften har gjort de nødvendige risikovurderingene av sin konkrete bruk av teknologien. I denne sammenheng vil involvering av alle relevante aktører, særlig operatørene, være av stor vekt.

## 8.7 Konsekvenser for togtrafikken

I forhold til referansealternativet kan innføring av batteridrift medføre ulike konsekvenser for togtrafikken.

### 8.7.1 Driftsopplegg

Batteri med ladesystem kan i prinsippet medføre konsekvenser for driftsopplegget på banestrekninger dersom det legges opp til lading i stillstand underveis på banestrekningene. Konseptet som er presentert her er basert på at det ikke skal gi negative konsekvenser for togtrafikken, det vil si at lading foregår i bevegelse på elektrifiserte strekninger, eller i stillstand ved banestrekningenes endepunkter innenfor eksisterende ruteplan. Det er også lagt til grunn en kjørestil som maksimerer hastigheten innenfor tillatt hastighet på banen, samtidig som kjøretøyene likevel vil klare å lade opp batteriene på ladestrekningene. Dette gjør at det finnes gode marginer i den foreslåtte elektrifiseringen.

### 8.7.2 Endring i togframføringstid

For vurdering av kjøretidsgevinst er det viktig å forstå forutsetningene lagt til grunn i energisimuleringene.

Kjøretiden er sterkt avhengig av kjøretøyenes effekt. En vesentlig forskjell mellom elektrisk drift og dieseldrift, slik som i referansealternativet, er nettopp kjøretøyenes effekt, og dermed også kjøretid. Som en del av simuleringene som er utført i forbindelse med vurdering av konseptene, så er det gjort en vurdering av kjøretid. I simuleringene er det lagt til grunn at kjøretøy på ikke-elektrifiserte strekninger som drives av batteri, har samme effekt som diesel. Kjøretøy som kjører på elektrifiserte strekninger har høyere effekt, og dermed også raskere kjøretid. For batterikonseptet innebærer dette mulige gevinster i kjøretid på de elektrifiserte strekningene. Gevinstene er størst for godstog. Basert på simuleringene er det funnet kjøretidsgevinster av betydning for godstog på strekningene GK25 Trondheim-Bodø på Nordlandsbanen og strekingen GK23 Dombås-Åndalsnes på Raumabanen. Besparelsene er anslått til opp til om lag 25 minutter (5 % av den totale kjøretiden) for strekningen Trondheim-Bodø og opp til 11 minutter (12 % av den totale kjøretiden) på strekningen Dombås-Åndalsnes. For sistnevnte strekning gjelder besparelsen kun i angitt retning som følge av stigningsforholdene på banen. For strekningen GK25 Trondheim-Bodø forutsetter kjøretidsbesparelsen at rutemodellen legges på nytt, og den reelle kjøretidsbesparelsen er derfor avhengig av ventetiden som settes ved kryssinger.

For persontog er kjøretidsgevinstene generelt vesentlig mindre enn for godstog, ettersom persontogene har et gunstigere forhold mellom effekt og vekt, og dermed lettere for å holde linjehastigheten ved lavere effekter. Kjøretidsgevinsten for persontog er funnet å være maksimalt 1 % av total kjøretid.

Eventuelle begrensninger i effekten fra matestasjoner kan medføre at kjøretøyene må tilbringe lenger tid på ladestrekningene for å full-lade batteriene dersom mange kjøretøy oppholder seg på samme ladestrekning til samme tid.

### 8.7.3 Robusthet i rutemodell og omløpstid for godstog

Økt effekt gir over en viss hastighet økt akselerasjonsevne, og med det bedre mulighet til å holde kjørehastigheten ved variasjoner i topografien. Konseptet vil ha økt effekt på de elektrifiserte strekningene i forhold til referansealternativets dieseldrift og strekninger med batteridrift. Dette kan bidra til større robusthet i ruteplanen ved at kjøretøyene har større mulighet til å tilpasse seg øvrig trafikk, og å kjøre inn igjen eventuelle forsinkelser på de elektrifiserte strekningene ved behov. Økt effekt kan på samme måte medføre større robusthet i omløpstider for godstog gitt at eventuelle kjøretidsgevinster kan nyttiggjøres innenfor bindinger i rutemodellen.

### 8.7.4 Standardisering av kjøretøyflåten

Batteridrevne hybride diesel-kontaktledning vil kunne bevege seg både på elektrifiserte og ikke-elektrifiserte banestrekninger, mens kjøretøy som ikke er utstyrt med batterier kun kan trafikere de banestrekningene som er fullelektrifiserte. I forhold til referansealternativet (bimodale diesel-kontaktledning kjøretøy) så innebærer dette ingen endring, da dagens kjøretøy basert på elektrisk drift har de samme begrensningene ift. de ikke-elektrifiserte strekningene som trafikkeres av dieseldrevne kjøretøy.

For å optimalisere konseptet for hver banestrekning er det mulig å tilpasse batteripakkene i kjøretøyene for den enkelte delstrekning. Dette kan i så fall innebære mindre fleksibilitet i kjøretøyflåten, med batterikjøretøy som i ytterste konsekvens ikke er interoperable med andre banestrekninger som har strengere krav til energibehov. Det anses som mest hensiktsmessig at batteripakker og del-elektrifisering tilpasses standardiserte kjøretøy for den enkelte operatør/eier sitt behov og for alle banestrekninger med batteridrift, slik at kjøretøyene kan skiftes mellom forskjellige linjer.

#### **8.7.5 Trafikk uten bytte av lokomotiv**

Noe av trafikken som i dag går over strekninger som delvis forsynes av elektrisk energi, og delvis er basert på diesel som energikilde, gjennomføres med bytte av lokomotiv. Dette gjelder eksempelvis tømmertrafikk på Dovrebanen fra stasjoner sør for Trondheim med overgang til Nordlandsbanen, og kjøretøy med gods og tømmer som i dag kommer via Dovrebanen til Hamar, og som skal videre mot Elverum og Kongsvinger. Kjøretøyene skifter fra elektrisk lokomotiv til diesellokomotiv på Hamar for videreføring til Elverum og Solørbanen til Kongsvinger. Fra Kongsvinger transporteres godset videre via elektrifiserte strekninger til Sverige, eller til Østfold via den elektrifiserte Kongsvingerbanen. Hel-elektrifisering av Solørbanen, og elektrifisering av Rørosbanen på strekningen Hamar-Elverum, vil knytte det elektriske nettet på Østlandet sammen, og gjøre at trafikk som kommer fra Dovrebanen kan kjøres gjennomgående via Elverum og Solørbanen mot Sverige og Østfold. Dette vil være av stor betydning for godstransporten på bane, og kan blant annet åpne for mulig retningsdrift for gods- og tømmertransport på Rørosbanen/ Dovrebanen slik det blir beskrevet for konseptet med elektrifisering i kapittel 9.7.2. Det betyr også at godselskapene i større grad kan bruke hel-elektriske lokomotiver dersom det vurderes som mest gunstig.

Strekningen Alnabru – Åndalsnes er i dag elektrifisert til Dombås med dieseldrift fra Dombås til Åndalsnes. Kjøretøy på denne strekningen drives i dag av bimodale lokomotiver, slik at nytten av å unngå et lokomotivskifte på Dombås er hentet ut.

#### **8.7.6 Sårbarhet ved ekstremtilfeller av norsk klima eller uforutsette hendelser**

Batterienes energimengde og ladekapasitet påvirkes av ekstrem kulde. Ved batteridrift vil det være en viss sårbarhet som det må tas hensyn til knyttet til rekkevidden ved svært lave temperaturer eller mye snø som gjør fremføringen energikrevende. Det samme gjelder beredskap ved uforutsette hendelser som medfører at tog blir stående på batteridrift over tid. I slike tilfeller kan kjøretøyene kjøre på redusert hastighet frem til neste ladestrekning for å redusere energiforbruket. Ved dimensjonering av batterier og ladesystem vil det planlegges med marginer for å sikre robusthet ved ekstrem kulde og snøvær. Alternativt kan avbøtende tiltak som snøbrøyting være aktuelt.

Relativt til referansealternativet med diesel vurderes konseptet ikke å være noe mer sårbart for ekstremtilfeller av norsk klima eller uforutsette hendelser. Det vurderes at denne sårbarhet vil i stor grad kunne håndteres i den daglige driften og med bruk av marginer ved planlegging av infrastruktur.

#### **8.7.7 Endret vedlikehold av kjøretøyflåten**

Det er vurdert at batterielektriske kjøretøy vil være enklere og rimeligere å vedlikeholde enn dagens dieselskjøretøy. Kjøretøy med ulike energibærere må også ha tilpassede anlegg og egen kompetanse for vedlikehold av de energibærerspesifikke komponentene på kjøretøyet. Det må tas stilling til hvilke jernbaneanlegg som skal tilrettelegges med teknisk utstyr og kompetanse for hvilke energibærere. For batterikonseptet betyr det at det vil være behov for spesifikk kompetanse og utstyr på verksteder som skal kunne håndtere vedlikehold av batteripakken (f.eks. bytte av moduler ved feil i battericeller).

Kompetanse, reservedeler og vedlikeholds utstyr for flere energibærere vil øke kompleksiteten i vedlikeholdet som i sin tur kan gi økt risiko for manglende evne til å utføre vedlikehold ved behov. Dette skal imidlertid ses opp mot referansealternativet, som er vurdert å ha et mye mer komplekst vedlikeholdsbehov enn batterikonseptet. Derfor er det vurdert at batterikonseptet totalt sett ikke medfører negative endringer for forutsetningene for vedlikeholdet.

### **8.7.8 Behov for andre fagmiljøer**

Bane NOR, Norske tog og togoperatørene er allerede sterke fagmiljøer på elektrisk drift og kontaktledningsanlegg. Opprettelse og drift av fagmiljø for flere ulike energibærere vil være heftet både med kostnader til lønninger og administrasjon og en økt sårbarhet knyttet til at det til enhver tid må være ansatt nok fagpersoner med riktig kompetanse i de ulike fagmiljøene. Dette gjelder da også for batterier.

### **8.7.9 Togtrafikk i driftsfase**

Det er forutsatt at utbygging av kontaktledningsanlegg og ombygging av tunneler gjennomføres som skiftarbeid med mulighet for opprettholdelse av trafikken gjennom anleggsperioden. Dette for å unngå at spesielt tungtransport flyttes fra jernbane til vei. Dette har vist seg å være mulig ved fornyelse av kontaktledningsanlegg, og ligger til grunn for kostnadsestimatet. Jernbanen har ikke tilsvarende erfaring med ombygging av tunneler, og det er derfor heftet noe usikkerhet ved hvordan dette kan og vil gjøres i praksis. Det er imidlertid et viktig premiss.

## **8.8 Mulig tidsplan for innføring av alternativet**

### **8.8.1 Beslutningsprosess**

Prosesen fram til en beslutning om investering i infrastrukturen og anskaffelse av kjøretøy med ny energibærer foreligger, består av flere ledd. Selve beslutningsprosessen forventes å kreve like mye tid, uavhengig av hvilket konsept som velges. Med hensyn til å realisere effekter på klimagassutslippene fra norsk jernbane innen 2030, er det en forutsetning at beslutningen tas og følges opp med budsjettmidler for gjennomføring relativt raskt.

Etter at KVVU GREEN er ferdigstilt, vil det gjennomføres en ekstern kvalitetssikring (KS1), som vil legge grunnlaget for en beslutning i regjeringen. Dette kan skje samtidig med at regjeringen legger fram sitt forslag til Nasjonal transportplan, og Stortinget behandler denne. Dette forventes medio 2024. Deretter vil det kunne bevilges midler til forprosjektfasen av prosjektet, inkludert utforming av hovedplan og detaljplan. Disse skal i sin tur gjennom en ny ekstern kvalitetssikring (KS2), før en investeringsbeslutning kan tas, anslagsvis tidligst i 2028.

### **8.8.2 Planlegging**

Før det kan bygges må det foreligge teknisk hovedplan, teknisk detaljplan, samt en godkjent reguleringsplan. Teknisk hovedplan utarbeides gjerne parallelt med kommunedelplan, mens en teknisk detaljplan utarbeides parallelt med detaljregulering. Erfaringsmessig kan det ta 5-10 år fra arbeidet med en teknisk hovedplan starter opp til man kan gjennomføre utbygging, men for hel- og del-elektrifisering hjelper det at det meste av berørte arealer allerede er avsatt til jernbaneformål.

Det forventes at minste nødvendige tid til planlegging av elektrifisering vil være 3-4 år, men den totale tidsbruken avhenger i stor grad av hvor mye av arbeidet som gjøres parallelt vs. sekvensielt. Bruk av internasjonale entreprenører kan bidra til å gjøre det mulig å gjennomføre mer av arbeidet innenfor en begrenset tidsramme, forutsatt tilgang på tilstrekkelig med budsjettmidler. Ettersom del-elektrifisering er en ny bruk av teknologien, som ikke har vært benyttet i Norge tidligere (og i begrenset grad internasjonalt) kan det forventes at planlegging av del-elektrifiseringen kan ta noe lengre tid.

Hovedplaner for strekningene kan gjennomføres parallelt, såfremt det er kapasitet i prosjektet og leverandørmarkedet. Gjennomføring av en hovedplan tar vanligvis rundt to år, avhengig av hvor mye som er avklart ved hovedplanens oppstart. Banens lengde og prosjektets kompleksitet spiller inn, og Raumabanen kan forventes å være raskere å planlegge enn Nordlandsbanen og Røros- og Solørbanen, som er mye lengre.

Detaljplan kan forventes å ta 1-2 år per parsell, og den totale tidsbruken vil avhenge av hvor stor andel av markedets kapasitet man bruker til planlegging i prosjektet. Erfaringen fra bygging av ny omformerstasjon på Hell tilsier at det tar ca. 2 år totalt å planlegge og prosjektere en omformerstasjon.

Ettersom det meste av arealet som berøres av elektrifiseringen allerede er satt av til jernbaneformål (for kontaktledningsanlegget, tunneler) eller veiformål (for bruer som må bygges om/erstattes), er det primært

omformerstasjonene og kobling av disse på det nasjonale strømmettet som vil kreve endringer i arealregulering. Dette kan være tidkrevende, avhengig av hva slags arealer som blir berørt, og tidlig avklaring av plassering av omformerstasjoner og tilkobling til nasjonalt strømmett anbefales.

### **8.8.3 Bygging**

Erfaringene fra elektrifisering av Nordlandsbanen Trondheim-Stjørdal, Stavne-Leangenbanen og Meråkerbanen tilsier at det er mulig å bygge opp mot 100 km kontaktledningsanlegg i året. Dette prosjektet har også jobbet primært som skiftarbeid i perioder på døgnet uten togtrafikk (hvite tider), noe som også er en forutsetning i KVVU GREEN, og spesielt viktig på baner med kombigodstrafikk (Nordlandsbanen, Raumabanen) og en klar fordel for reisende og tømmernæringen som benytter Røros- og Solørbanen. Det forventes å være mulig å bygge hurtigere dersom man settes på flere ressurser, bl.a. i forbindelse med montering av kontaktledningsanlegget (flere boretog for kontaktledningsmaster).

Erfaringen viser at det tar i overkant av to år å bygge en omformerstasjon, og like lang tid å planlegge/prosjekttere den. Forutsatt tilstrekkelig kapasitet i prosjektet/markedet, kan nye omformerstasjoner planlegges og bygges parallelt med hverandre.

Gjennomføringstempo blir dermed også et spørsmål om økonomisk prioritering, både fordi det innvirker på hvor mye midler som bevilges samtidig til elektrifisering av jernbanen, og fordi samtidig gjennomføring på flere baner/flere steder på samme bane kan forventes å presse prisene i leverandørmarkedet noe opp.

Gitt omfanget av de ulike banene medfører forutsetningen om ca. 100 km per år følgende bruk av tid til elektrifisering, forutsatt at man begynner i én ende og jobber seg framover. Noe tid til opprigging må påregnes i tillegg. Det påpekes at det er stor usikkerhet knyttet til disse anslagene, da økt ressursbruk og parallelt arbeid flere steder på banen kan redusere tiden det tar å bygge. For Nordlandsbanen tilsvarer dette ca. 2,5 år og for Røros- og Solørbanen tilsvarer det ca. 2,5 år. Som følge av at det tar to år å bygge en omformerstasjon, anses det som et minste krav til tidsbruk (uavhengig av antallet parallelle entrepriser per bane), og omformerstasjonen er den delen av prosjektet som kan forventes å være dimensjonerende for tiden det vil ta å elektrifisere Raumabanen.

Tiden det tar å bygge avhenger naturlig nok også av stedlige forhold som tilstand på eksisterende infrastruktur, grunnforhold, topografi og trafikkmengde.

### **8.8.4 Anskaffelse av kjøretøy**

For persontrafikken avhenger anskaffelsestiden primært av om kjøretøyene kan anskaffes gjennom en opsjon i eksisterende avtale med en kjøretøyleverandør, eller om en slik avtale først må inngås. Selve inngåelsen av en slik avtale kan forventes å ta 3-4 år for kjøretøy med nye energibærere, og selve spesifikasjonen, produksjonen og leveransen av kjøretøyene tar ca. 3-6 år, bl.a. avhengig av hvor umoden og ukjent teknologi som tas i bruk. Generelt sett tar mindre moden teknologi lengre tid å anskaffe, produsere og testkjøre.

#### *Regiontog*

Nye regiontog med batteri vil ta 3-5 år å anskaffe dersom de kan anskaffes som del av en eksisterende avtale. En mulighet kan være en eventuell framtidig avtale om nye regiontog til Østlandet og andre deler av landet, dersom denne utformes for å også inkludere kjøretøy med nye energibærere. Dersom det må etableres en egen avtale med kjøretøyprodusent for formålet, vil det ta om lag 7-10 år å anskaffe nye regiontog. Eksisterende kjøretøy i markedet er i større grad tilpasset korte linjer, og anskaffelsestiden vil påvirkes av om man kan kjøpe kjøretøy som allerede er utviklet, eller om kravspesifikasjonen innebærer at kjøretøyprodusentene utvikler nye kjøretøytyper.

De dieseldrevne regiontogene som brukes på de ikke-elektrifiserte strekningene, type 93, oppnår forventet levealder i 2030-32, og må erstattes av nye kjøretøy ved endt levetid. Planlegging av denne anskaffelsen avventer anbefaling og beslutning om framtidig energibærer på de ikke-elektrifiserte strekningene.

De bimodale diesel-kontaktledning regiontogene som brukes på de ikke-elektrifiserte strekningene, type 76, har forventet levetid fram til ca. 2051. Hva som skjer med disse ved overgangen til en ny energibærer må vurderes nærmere. Ved elektrifisering vil de, som bimodale kjøretøy, være egnet til bruk i en

overgangsperiode med delvis elektrifisering. Når elektrifiseringen er ferdig, kan de brukes som de er eller bygges om, avhengig av hva en kost-nytte-vurdering viser at er mest hensiktsmessig.

#### *Fjerntog*

Norske togs avtale med Stadler om anskaffelse av nye fjerntog kan brukes i ca. 10 år fra 2023. Avtalen kan benyttes for å anskaffe nye fjerntog med kontaktledning eller kontaktledning/batteri som energibærere. Nye fjerntog med batteri som energibærer vil da ta anslagsvis 3-5 år å anskaffe, men som følge av at det er mindre erfaring med bruk av denne energibæreren på fjerntog enn for regiontog, kan det også ta lengre tid.

#### *Godstog*

For godslokomotiver er anskaffelsesprosessen ofte raskere enn for kjøretøy til persontrafikken, spesielt for aktører som ikke er underlagt offentlig anskaffelsesregelverk. Godstogoperatørene avgjør i større selv hvor omfattende eller enkelt de utformer anskaffelsesprosessen, og det er mindre behov for spesialtilpasning til transportoppgaven enn på persontog (hvor det skal bestemmes setekonfigurasjon, ombordfasiliteter osv.). Selve avtaleinngåelsen tar om lag 0,5-1 år.

Ettersom batteri- og hydrogenlokomotiver fremdeles er en relativt umoden teknologi, ventes det å ta lengre tid å få levert slike lokomotiver enn andre typer. F.eks. forventes det at Wabtec vil bruke 1-2 år på å designe, produsere og teste et batterilokomotiv for Rio Tinto (for bruk i Australia) [16]. Stadler anslår at hele prosessen med design, produksjon, homologisering og idriftsetting av et lokomotiv med ny energibærer tar 4-5 år.

I denne utredningsfasen er det for hydrogen- og batterilokomotiver antatt at drivkraften vil bestå av et elektrisk lokomotiv som forsynes med energi fra strømvogner (der det er kontaktledning) og en etterhengt energivogn med hhv. hydrogentank, brenselceller og batteri eller kun batteri. Totalt anslås det å ta ca. 5-9 år å anskaffe godslokomotiv og/eller energivogn med hydrogen, avhengig av bl.a. hvor mye innovasjon og utvikling som er nødvendig. Hvor lang tid det tar avhenger imidlertid også av når anskaffelsen planlegges gjennomført (ettersom teknologien er i utvikling og modning), og om anskaffelsen er det første lokomotiv pluss energivogn som skal leveres av en gitt type.

Med opplysningene over er det sannsynlig å kunne forvente en gradvis innfasing av batteri fra ca. 2035-2038 frem mot at levetiden til eksisterende kjøretøy med diesel etter hvert går ut.

#### **8.8.5 Mulige pilotprosjekter**

For batterikonseptet vil det være fordeler med en pilot for å teste ut de deler av konseptet som har minst grad av modenhet og størst usikkerhet. Dette gjelder godslokomotiver med batterivogn eller energivogn. Det vil da også være mulig å se hvordan konseptet vil påvirkes av behovet for fleksibilitet i henhold til ruteplanen, hvor det i virkeligheten vil oppstå situasjoner som vil kreve marginer i batterikapasitet. Det er lagt in marginer i denne KVV-en, og det vil være fordeler med å verifisere at den foreslåtte elektrifiseringen også fungerer basert på erfaring fra drift. En annen gevinst ved leid eller kjøpt pilot er at godsoperatør eller leasingselskap kan få motivasjon til å bestille nye kjøretøy basert på hybride batteri-kontaktledning utover at de i dag er fortrolige med bimodal diesel-kontaktledning.

Pilotprosjektet må være en avveining mellom kostnad og nytte. En fordel hadde kunnet være å benytte toglinjer som per i dag går delvis på elektrifisert strekning for å teste ut batterikonseptet. Problemet er at den eneste linje der dette er mulig uten å bygge ny elektrifisering er regiontoget mellom Lundamo-Steinkjer, og det er ikke for slike persontog som det er størst nytte å gjøre et pilotprosjekt.

En annen mulighet er å bruke eksisterende elektrifisering (på hel-elektrifiserte toglinjer) som ladestrekninger, og hvor det gjennom bruk av geo-fencing blir satt opp «innbilte» ikke-elektrifiserte strekninger. På den måten vil det ikke kreves bygging av ny elektrisk infrastruktur. Dette kan imidlertid gi ulemper for den trafikk som allerede går hel-elektrifisert. De baner som er elektrifisert har ofte mye trafikk, og hvor et slikt pilotprosjekt kan ha negativ påvirkning på ruteplanen.

Et mulig pilotprosjekt er å teste ut batterikonseptet for godstogene som går på Raumabanen med den infrastruktur som er foreslått i kapittel 8.3.3. Fordelen med et pilotprosjekt for denne banen, dersom konseptet blir anbefalt, er at den infrastruktur og kjøretøy som det investeres i kan fortsette å bli brukt etter at målene med pilotprosjektet er oppnådd. Dette kan sammenlignes med et pilotprosjekt på en annen (elektrifisert) bane (f.eks. Roa-Hønefoss) hvor det ikke blir den fordel at det bygges infrastruktur som



seinere vil bli benyttet i konseptet. Dette må veies mot forskjellen i kostnad for infrastruktur, hvor en hel-elektrifisert bane har lavere investeringskostnad.

Investeringskostnadene for infrastruktur for et slikt pilotprosjekt på Raumabanen oppgår til 1100 MNOK, men hvor det er bekreftet av Bane NOR at denne kostnad kan reduseres noe dersom det kan gjenbrukes en eksisterende omformerstasjon som ikke brukes per i dag (i størrelsesorden en reduksjon på 60 MNOK) slik at kostnaden for infrastruktur blir omtrent 1040 MNOK. Utover dette vil det kreve anskaffelse av anslagsvis to godstog til en pris om 200 MNOK stykk, totalt omtrent 400 MNOK. Denne pris er usikker fordi det kun anskaffes noen få kjøretøy, samtidig kan det være en kontrakt med delt kostnad, risiko og kunnskapsutbytte mellom Jernbanedirektoratet, operatør/kjøretøyeiere og kjøretøyprodusent, slik at prisen kan holdes innenfor anslått verdi. Dette betyr at totalkostnaden for infrastruktur og kjøretøy havner på omtrent 1500 MNOK.

Innføringstiden for et slikt pilotprosjekt er anslått til ca. 4 år for infrastrukturen som beskrevet i kapittel 8.8.3. For anskaffelse av lokomotiver tar det 2,5-5 år å anskaffe godslokomotiv med batteri, avhengig av bl.a. hvor mye innovasjon og utvikling som er nødvendig. Dette kan skje delvis parallelt med planlegging og bygging av infrastruktur, men det kan kreves at anskaffelsen av kjøretøyene starter eksempelvis 1 år etter påbegynt planlegging av infrastruktur, da valgt infrastruktur legger føringer for lokomotivet. Totalt antas det derfor å kunne ta 3,5-5 år å få et slikt pilotprosjekt klart til testkjøring.

## 8.9 Kostnader

Konseptet batteri, med tilhørende ladesystem, innebærer relativt til nullalternativet investeringer i både infrastruktur og kjøretøy. Overordnet består investeringene i infrastrukturen av følgende elementer:

- Utbygging og tilpasninger av KL og kryssingsspor ved stasjoner
- Omformerstasjoner
- Tilpasninger av gang- og sykkelbruer og overgangsbruer for å muliggjøre elektrifisering
- Skjermende tiltak
- Utvidelse av tunneler og portaler som er for lave for kontaktledning
- Etablering av kontaktledning i tunnel og fri linje
- Nye jernbanebruer
- Heving av eksisterende overgangsbruer

I det følgende beskrives hovedmomentene i hvilke investerings- og vedlikeholdstiltak som forutsettes i dette konseptet. Det henvises til underlagsrapporten Grunnkalkyle for nærmere detaljer om metoder og byggeklosser som er benyttet i beregningen av kostnader. Det henvises til rapport om Usikkerhetsanalysen for nærmere beskrivelse av usikkerhetsanalysen. Satsene som gjengis i det følgende er justert iht. P50-verdiene fra usikkerhetsanalysen.

Tabellene nedenfor beskriver kostnader tilknyttet investering i infrastrukturen, fordelt på element og bane.

Tabell 31 Investeringskostnader i infrastrukturen i konsept 3 Batteri

Infrastrukturelement	Nordlandsbanen	Raumabanen	Røros- og Solørbanen
Verksted og beredskapstiltak	81	81	81
Omformerstasjoner, inkl. tilkobling til nasjonalt strømnnett	2 757	460	919
Kontaktledning, høyspentledning langs jernbanen	3 402	563	3 264
Tilrettelegging av tunneler for elektrisering	16	0	16
Tilrettelegging av bruer for elektrifisering	214	0	1 097
<b>Sum</b>	<b>6 471</b>	<b>1 103</b>	<b>5 377</b>

Vedlikeholdskostnadene for infrastrukturen er i stor grad en konsekvens av de økte kostnadene ved å vedlikeholde kontaktledningsanlegg og omformerstasjoner. Tiltakene for å utvide tunnelprofiler og heve bruer forutsettes ikke å øke vedlikeholdskostnadene, da dette er tiltak (til dels fornyelse) på infrastruktur som allerede er i bruk. Vedlikeholdet av disse inngår i referansealternativet.

Tabell 32 Vedlikeholdskostnader for infrastrukturen i konsept 3 Batteri

Vedlikeholdskostnader for infrastruktur	Nordlandsbanen	Raumabanen	Røros- og Solørbanen
Sum vedlikeholdskostnader (mill. kr. per år)	33,6	3,5	26,3

Det er forutsatt samme kjøretøyflåte, men ulik energibærer, i alle konsepter:

- Regiontog, ca. 110 m lange motorvognsett. Omfatter også regiontog i distrikt, som sannsynligvis vil være kortere enn regiontog til bruk i byområdene.
- Fjerntog, 220 meter lange motorvognsett.
- Godsløkomotiv, 6-akslet.

Kjøretøyene vil ha ulike anskaffelseskostnader, avhengig av hvilken energibærer som benyttes. Batterikjøretøy er ikke et ferdig produkt og har dermed en usikkerhet knyttet til anskaffelseskostnad, men vil være dyrere enn dagens dieseldrevne tog.

Tabell 33 Investeringskostnader for kjøretøy forutsatt i konsept 3 Batteri

Kjøretøytype	Per kjøretøy	Nordlandsbanen	Raumabanen	Røros- og Solørbanen
Regiontog	279	5 025	838	2 233
Fjerntog	677	2 707	0	0
Godstog	197	2 360	393	2 753
<b>Sum</b>		<b>10 092</b>	<b>1 231</b>	<b>4 986</b>

Det er forutsatt at batteriene byttes ut hvert 10. år. Omregnet til en årlig kostnad, gir det følgende kostnader per år.

Tabell 34 Batterikostnader for kjøretøy (sum per togkategori per bane) i millioner kr/år i konsept 3 Batteri

Kjøretøytype	Nordlandsbanen	Raumabanen	Røros- og Solørbanen
Regiontog	11,6	1,9	5,2
Fjerntog	4,2	0,0	0,0
Godstog	25,2	4,2	29,4
<b>Sum</b>	<b>41,0</b>	<b>6,1</b>	<b>34,6</b>

## 8.10 Oppnåelse av effektmål

### 8.10.1 Reduserte klimagassutslipp innen 2030

Hvorvidt det er mulig å oppnå reduserte klimagassutslipp innen 2030 avhenger i stor grad av hvilke forutsetninger som blir satt for beslutning, planlegging og gjennomføring av konseptet. For konseptet

batteri forventes det å ta lang tid å anskaffe kjøretøy, samt planlegging og bygging av nødvendig infrastruktur, og det blir sett på som urealistisk med en full innføring før 2030.

Det er allikevel mulig å gjennomføre pilotprosjekter, og private aktører som leier eller har mer effektive beslutnings- og anskaffelsesprosesser vil kunne anskaffe kjøretøy slik at det vil være mulig å kunne overføre noe trafikk til en ny energibærer. Det vil derfor kunne være potensiale for å oppnå noe redusert klimagassutslipp i forhold til dagens dieseldrift innen 2030 – gitt en rask beslutningsprosess.

### 8.10.2 Reduserte klimagassutslipp innen 2050

Alternativet reduserer klimagassutslippet fra persontog og godstog ned mot null, sammenlignet med en videreføring av dagens dieseldrift.

Som vist i vedlegg klimagassutslipp og Tabell 60 vil konseptet for batteri ha et totalt klimagassutslipp på 162 738 tonn CO<sub>2</sub>-ekv. over en periode på 75 år, hvor største delen av utslippet er knyttet til indirekte utslipp i driftsfasen, som da omfatter utskiftning av teknisk utstyr slik som batterier. Konseptet vil være «break-even» etter 1,4 år i drift.

Alternativet er vurdert å kunne settes i drift i ca. 2035.

### 8.10.3 Energieffektivitet

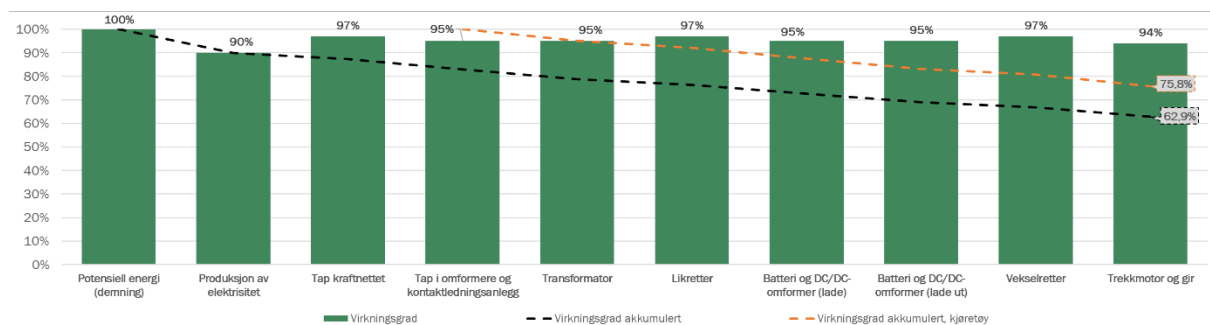
#### Energieffektivitet WTW (well-to-wheel)

Sammenlignet med diesel blir energieffektiviteten for dette konseptet høy. Forutsatt at energien først går til batteriet, og deretter til motorer og hjelpekraft, blir energieffektiviteten cirka 76 %. Utover dette så gir konseptet mulighet for å ivareta bremseenergi fra motorer for lagring i batteriene i høyere grad enn hva som er mulig med de andre konseptene. Virkningsgraden i kjøretøyet i batterikonseptet vil dermed variere avhengig av driftsmodus.

For jernbanens elektriske system regnes det på virkningsgrad for omformerstasjonen og for kontaktledningsanlegget. Basert på kvalitetssikrede tall fra Bane NOR, er disse satt til 97% for omformerstasjon og 98% for kontaktledningsanlegg, som gir en total virkningsgrad på 95% for jernbanens elektriske energiforsyning.

Før omformerstasjonen transporteres elektrisiteten i det overliggende el-nettet fra kraftverket til jernbanens omformerstasjon. Denne effektivitet er satt til 97% basert på erfaringstall fra Bane NOR. Før el-nettet er det energitap i produksjonen av elektrisitet i kraftverket, hvor virkningsgraden kan regnes 90% som et gjennomsnittstall. Dette kan imidlertid variere ganske mye mellom kraftverkene.

Energieffektiviteten for batteri i hele kjeden «well-to-wheel» er dermed beregnet til omtrent 63 %.



Figur 31 Virkningsgrad – Del-elektrifisert jernbane for batterikjøretøy (hele kjeden «well-to-wheel»)

#### Forbruk av knappe ressurser

Dette konseptet benytter elektrisitet som energikilde. Det norske forbruket av strøm er på 133 TWh [13]. Energiforbruket i dette alternativet er beregnet til 121 GWh. Hensyntatt tap i transport av strøm gir dette et energibehov på omtrent 132 GWh. Dette strømforbruket utgjør en liten del av det totale strømforbruket i

Norge (kun ca. 0,1 % av totalmarkedet). Konseptet anses derfor ikke å benytte en uforholdsmessig stor andel av en knapp energiressurs – som potensielt kan motvirke omstilling i andre sektorer, og vektes dermed likt som referansealternativet.

Konseptet bruker batterier for energilagring. Råstoffene som blir brukt til produksjon av batteriene, f.eks. sjeldne metaller, kan være begrensede. Det er stor etterspørsel på slike materialer for å imøtekomme alle samfunnssektorenes behov for omstilling til et lavutslippssamfunn. Det er imidlertid vanskelig å konkludere at disse materialene, og batteriet i sin helhet, burde regnes som en knapp resurs. For litium er det f.eks. anslått å være tilstrekkelig råmateriale, men utvinningskapasiteten er i dag lavere enn etterspørselen. Det finnes ingen rasjonering av disse materialene eller produktene, og det oppdages kontinuerlig nye kilder for utvinning av materialer til bruk i batterier. Det konkluderes derfor med at batterikonseptet ikke bruker materialer som vurderes å være knappe ressurser, grunnet at det ikke er gitt signaler om at batterier faktisk vil være definert som en knapp resurs i overgangen til et utslippsfritt samfunn.

#### **8.10.4 Togtilbudets attraktivitet**

*Togenes akselerasjonsevne som funksjon av kjøretøy og energitilgang, og togenes trekkraft, dvs. mulighet for fremføring uten pådragsrestriksjoner som følge av energiforsyning.*

Akselerasjonen er en konsekvens av trekkraft, vekt og kjøremotstand. Ved lavere hastighet er det adhesjonsvekt (vekt på aksler som har motorer) og adhesjonsutnyttelse som begrenser trekkraften, mens for høyere hastigheter er det effekten.

For batterikonseptet er det lagt til grunn at det er omtrent den samme adhesjonsutnyttelsen, enkelt beskrevet som utnyttelse av friksjonen mellom hjul og skinne, som ved bruk av diesel. Det er vurdert at togvekten vil påvirkes av batteripakkevekten, og at dette vil ha forskjellig påvirkning på akselerasjonsevne avhengig av type kjøretøy. Lokomotiver har oftest maksimert aksellast innenfor hva som er tillatt for å gi så høy trekkraft som mulig. For batterilokomotiver vil dette også være slik lokomotivene utformes. Det er lagt til grunn at batterivognen ikke har traksjonsutstyr, batteripakker til lokomotiver vil derfor ikke øke adhesjonsvekten. For motorvognsett vil batteripakken kunne påvirke adhesjonsvekten.

For lokomotiver vil den ekstra vekten fra batteripakken og den ekstra vognen som eventuelt benyttes være mellom 30-90 tonn, hvor den høyeste verdien er for en seksakslet vogn med førerhus. Det er forutsatt at den ekstra vekten ikke vil øke adhesjonsvekten. For godslokomotivene vil den ekstra vekten tilsvare omtrent 2,5%-7,5% av det totale togets vekt (antatt 1200 tonn togvekt uten batteripakke), og det vil resultere i opp mot omtrent 9% lavere akselerasjon gitt den samme trekkraft. I dette tilfellet er det antatt at operatøren ikke vil redusere togets øvrige vekt for å kompensere for vekten fra batteripakken. For motorvognsett vil den ekstra vekten tilsvare opp mot omtrent 7% høyere vekt. For motorvognsettene er det rimelig å anta at batterienes vekt ikke påvirker prosentandelen av adhesjonsvekten, slik at økningen i vekt vil gi en tilsvarende økning i trekkraft, og at den resulterende akselerasjonen vil være omtrent den samme. For alle konseptene så er det antatt en lavere tilgjengelig effekt på ikke-elektrifisert strekning sammenlignet med effekten på elektrifisert strekning, som følge av høyere tilgjengelig effekt under kontaktledning. Dette presenteres nærmere i delrapport Energisimulering KVU GREEN. Trekkraften (ved høyere hastighet) vil kun være høyere dersom kjøretøyet kjører under kontaktledning. For batterikonseptet er det mer elektrifisering sammenlignet med diesekonseptet, som kun bruker eksisterende elektrifisering. De elektrifiserte strekningene er også plassert der hvor det er høyt energibehov, f.eks. rundt Saltfjellet og i den bratteste delen på Raumabanen, hvor akselerasjonen ved høyere hastighet (og den resulterende hastigheten) blir begrenset av effekten for noen toglinjer hvis den er lavere.

Med bakgrunn i dette er det vurdert at batterikonseptet gir potensiale for økt trekkraft og akselerasjon relativt til diesel, men den økte vekten for godstoget vil påvirke akselerasjonen noe negativt ved lave hastigheter. Totalt sett over lengre strekninger vil akselerasjonen være bedre i batterikonseptet enn for diesekonseptet.

*Ulemper for togtilbudet som følge av lade- og tankestopp, blant annet ladetider, kapasitetsrestriksjoner ved ladepunktet og bindinger i ruteplanlegging til ladestopp.*

For dette konseptet er det lagt til grunn en del-elektrifisering som muliggjør lading samtidig som toget kjører (benevnt som «lading i bevegelse» i kapittel 8.1.2). Med denne forutsetningen vil det ikke være noen negativ påvirkning på togtilbudet med hensyn til lade og tankestopp, og det er vurdert at konseptet totalt sett vil være nøytralt relativt til diesel for denne indikatoren under normal drift. Ekstreme tilfeller, som

eksempelvis snø, svært lave temperaturer eller uforutsette hendelser kan medføre ulemper dersom energien i batteriene ikke er tilstrekkelig til å rekke frem til neste lademulighet. Eventuelle ulemper ved ekstreme tilfeller er vurdert å være tilsvarende som referansealternativet og øvrige konsepter.

*Konsekvenser for effektiv tog lengde, blant annet lengdemeter i toget som går bort til energilager og dermed ikke kan brukes til reisende eller gods*

For persontogene (motorvognsett) så er det forskjellige måter for integrering av batteripakken i kjøretøyet, og dette kommer an på hvordan den enkelte kjøretøysleverandøren velger å integrere batteripakken i sin kjøretøysplattform. Avhengig av hvilken løsning som blir valgt så kan det resultere i at batteripakken tar plass som kunne vært brukt for passasjer.

For kortere tog, slik som regiontog i distrikt, er det mindre sannsynlig at batteripakken vil redusere antall plasser for passasjer. Dette er også bekreftet fra RFI og offentlig informasjon om de kjøretøy som tilbys på markedet. Relativt referansealternativet, som er et bimodalt diesel-kontaktledningskjøretøy, er det vurdert at det ikke er noe negativ innvirkning på tog lengden.

Det skal poengteres at det for type 76, som er et regiontog, brukes en egen vogn med dieselmotorer i referansealternativet, og det er sannsynlig at en slik løsning også vil gi tilstrekkelig med volum og vekt for batteripakken for et slikt kjøretøy. Samtidig finnes det store motorvognsett med 5 vogner for batteridrift som tilbys på markedet, og som har batterier integrert i enten gulv og/eller tak. Integreringen i gulv og tak vil da være positivt for den effektive tog lengden. Det er, basert på informasjon fra kjøretøysleverandører, vurdert at for regiontog vil et konsept med batterier gi omtrent den samme effektive tog lengde som et tilsvarende bimodalt diesel-kontaktledningskjøretøy.

For lengre tog av typen fjern tog, er det noe mer sannsynlig at batteripakkens størrelse, og eventuell begrensning i hvor spredt batteriene kan plasseres, gjør at rom som ellers hadde vært brukt til passasjerer brukes til batterier. Relativt referansealternativet er det vurdert at energibæreren vil kreve noe mer plass enn det som dieselutstyret ellers hadde brukt. Dette bekreftes også av informasjon fra kjøretøyprodusenter gjennom Norske tog. Samtidig er det usikkerhet knyttet til hvorvidt dette er representativt for de konsept som er mulige for plassering av batterier. Dette er basert på den informasjonen at batterikonseptet kan resultere i opptil en 20% reduksjon av antallet sitteplasser.

For lokomotiver for persontog så vil det sannsynligvis være tilstrekkelig med vekt og volum i et seksakslet lokomotiv for å klare drift for persontog, noe som er bekreftet fra kjøretøysleverandører.

Basert på kapittel 8.5 så er det vurdert at i batterikonseptet vil energibæreren (i form av en batterivogn) påvirke den effektive tog lengden for godstog i den forstand at den vil forbruke tog lengde tilsvarende én godsvogn. Per i dag er det slik at et kjøretøyskonsept som trenger et lengre lokomotiv enn dagens dieselskjøretøy ikke vil påvirke tømmer togene. Det er togvekten som er begrensende for disse. For kombitogene (f.eks. Trondheim-Bodø) så vil en batterivogn (eller energivogn) forbruke nyttig last tilsvarende en vogns lengde. Det er sannsynlig at det vil bli samme reduksjon for malmtogene fordi disse begrenses av kryssingssporens lengde mellom Mo i Rana – Ørtfjell.

*Togets aksellast kan realisere hastigheter iht. overbygningsklasse C.*

Denne indikatoren vurderer i hvilken grad konseptene medfører økning i aksellasten slik at det påvirker tillatt hastighet i henhold til overbygningsklasser. For motorvogner inntreder det en begrensning i hastigheten hvis aksellasten er over 18 tonn. For godstogene inntreder begrensninger i hastigheten ved 18 tonn og 20,5 tonn. Tabell 22 viser tillatte hastigheter ved ulike aksellaster for overbygningsklasse C.

Det er blitt stilt spørsmål gjennom RFI i KVVU GREEN til kjøretøysleverandører om dette temaet. Minst én leverandør har svart at for motorvognkonseptene så vil energibæreren ikke gi noe begrensning i hastighet, og at hastigheten vil være opptil 160 km/t. Det betyr at det vurderes at aksellasten ikke vil være mer enn 18 tonn. Det er imidlertid uklart hvis svarene i RFI virkelig har tatt hensyn til overbygningsklasse C. Som referanse kan det nevnes at det bimodale kjøretøyet Type 76 har maksimal aksellast på 21 tonn, noe som betyr at disse begrenses til 130 km/t.

For lokomotiver er det ikke svart ut i RFI hvordan overbygningsklasser vil påvirke tillatt hastighet. Som referanse kan det nevnes at for diesellokomotivet CD312, som blir brukt av Cargo Net per i dag på blant annet Nordlandsbanen, så er aksellasten 20,5 tonn (123 tonn fordelt på 6 aksler). Det betyr at disse

dieselskjøretøyer er tillatt å kjøre i 100 km/t (godkjent iht. EN 14363) for overbygningsklasse C. Det er lagt til grunn i batterikonseptet at lokomotivet og batterivognen vil ha en akselvekt som ikke overstiger 20,5 tonn, se kapittel 8.5. Relativt konseptet med diesel så betyr det at konseptet ikke vil resultere i en lavere makshastighet enn hva som er aktuelt med referansealternativet. Det skal i denne sammenheng nevnes at referansealternativet ikke er et diesellokomotiv, uten et bimodalt diesel-kontaktledningslokomotiv. Det er sjekket med hva som tilbys i markedet, og kan konstateres at det finnes bimodale diesel-kontaktledning lokomotiver med aksellast som ikke er høyere enn 21 tonn (og sannsynligvis kan tilpasses 20,5 tonn) samtidig som effekten ved hjulene er omtrent 6 MW i elektrisk modus og 3 MW i diesel-modus, og hvor disse er seksakslede.

Tabell 35 Hastigheter gitt aksellast for overbygningsklasse C. Overbygningsklasser [1].

Overbygningsklasse	Vogner i persontog		Motorvognsett		Godstog/arbeidsmaskiner		
	Nominell aksellast (tonn)	Maks hastighet (km/h)	Nominell aksellast (tonn)	Maks hastighet (km/h)	Nominell aksellast (tonn)	Maks hastighet (km/h)	Maks hastighet boggier godkjent iht EN 14363 (km/h)
	<b>c</b>	18	160	20,5 18	130 160	22,5 20,5 18	80 90 100

### 8.10.5 Samlet oversikt over effektmåloppnåelse

Tabell 23 viser samlet vurdering av oppnåelse av effektmål for konsept 3 – Batteri.

Tabell 36 Samlet vurdering av oppnåelse av effektmål for konsept 3 - Batteri

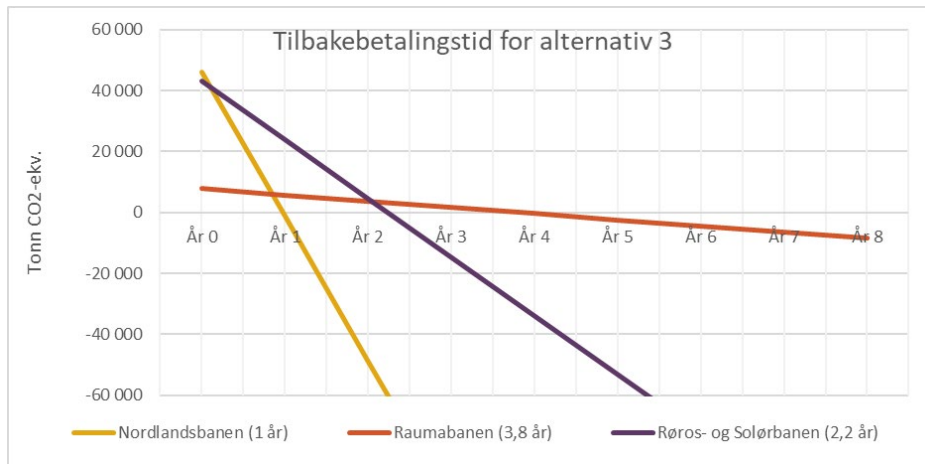
Effektmål	Vurderingsmetode	Måleenhet	Verdi (avrundet)	Relativ skår
1. Utslipp innen 2030	Beregnet CO <sub>2</sub> -utslipp	Tonn CO <sub>2e</sub> årlig gjennomsnitt 2023-2029	<70 000	(+)
2. Utslipp innen 2050	Beregnet CO <sub>2</sub> -utslipp	Tonn CO <sub>2e</sub> årlig gjennomsnitt over levetiden	2 200	+++
3. Energieffektivitet	Energieffektivitet WTW	Prosentvurdering	63 %	++(+)
	Forbruk av knappe ressurser	Kvalitativ vurdering	0,1 % av brutto strømforbruk i Norge	0
4. Attraktivitet	Akselerasjonsevne	Kvalitativ vurdering		++
	Trekraft	Kvalitativ vurdering		++
	Lade-og-tankestopp	Kvalitativ vurdering		0
	Effektiv tog lengde	Kvalitativ vurdering		(-)
	Aksellast	Kvalitativ vurdering		0

## 8.11 Tilfredsstillelse av rammebetingelser

Dersom enkelte av løsningsalternativene ikke tilfredsstiller rammebetingelsene innenfor en tidsperiode, må det tas stilling til om alternativet skal forkastes, eller om det eventuelt kan fungere i en kombinasjonsløsning eller for deler av jernbanesektoren.

### 1. Løsningen må ikke bidra til å øke de globale klimagassutslippene.

En forenklet beregning av globale klimagassutslipp viser at utslipp av CO<sub>2</sub>-ekvivalenter i forbindelse med investering er innspart i løpet av 1,4 år for konseptet samlet sett. Se figuren under for fordeling per strekning. Rammebetingelsen anses dermed oppfylt med god margin (se klimavedlegg).



Figur 32 Tilbakebetalingstid for konsept 3 for de ulike banestrekningene

### 2. Realiserbarhet i drift:

Løsningen må ha et driftskonsept som muliggjør effektiv drift under forventede fremtidige myndighetskrav.

Som beskrevet i kapittel 8.7 så vil konseptet, under normale driftsforhold, resultere i en drift som ikke påvirker togtrafikken negativt. Det er vurdert at konseptet med batteridrift for jernbanekjøretøy vil bli enda mer utviklet og velprøvd i fremtiden, og hvor dagens og forventede fremtidige myndighetskrav vil sørge for at sikkerheten opprettholdes. Det finnes ingen indikasjoner at forventede fremtidige myndighetskrav vil begrense bruken av batterier – det som forventes er at slike krav vil øke modenheten for teknologien og hjelpe produsenter og kjøretøyeiere å utvikle å bruke velprøvede løsninger.

Teknikken er bevist å være realiserbart for mindre kjøretøy som persontog tilsvarende regiontog, fordi disse er blitt levert og testet i drift. Analysen av teknologimodenhet i kapittel 8.5 viser at teknikken også er realiserbart for lengre persontog og godstog.

### 3. Driftsstabilitet og regularitet:

En løsning kan ikke gi lavere nivå av driftsstabilitet eller regularitet enn referansealternativet.

Det som innvirker på konseptets totale driftsstabilitet, er driftsstabiliteten for infrastrukturen og kjøretøyene. For infrastrukturen blir det innført kontaktledningsanlegg av konvensjonell type, og denne vurderes å ha svært høy driftsstabilitet, noe som er bekreftet fra Bane NOR.

Det er kjent at dieselmotorkjøretøy har generelt lavere driftsstabilitet enn tilsvarende elektriske kjøretøy. For batterikjøretøy blir dieselmotorkjøretøyet byttet ut mot batteripakker. Batteripakker er vurdert å ha høyere driftsstabilitet enn tilsvarende dieselmotorkjøretøy. Dette motiveres av at batteripakken har veldig lavt behov for vedlikehold og at det ikke er noe mekaniske deler som kan forårsake feil og er i behov av vedlikehold på den måten som det er behov for i dieselmotorer. Det er kjent at dieselmotorene i dieseltog generelt har stort behov for vedlikehold og har flere kilder til feil som kan påvirke driften negativt.

Elektrisk drift (på del-elektrifiserte strekninger) gir bedre akselerasjon og mulighet for høyere hastighet ved behov for særskilt høy effekt (f.eks. tunge godstog i oppoverbakker). Dette gir tog med elektrisk drift bedre mulighet til å holde en gitt rute, og til å hente inn eventuelle forsinkelser, enn det dieseldrift gjør, noe som innvirker positivt på regulariteten.

Batterikjøretøy i kombinasjon med del-elektrifisering kan dermed forventes å gi bedre driftsstabilitet og minst like god regularitet som i referansealternativet. Mot bakgrunn av dette konkluderes det at batteridrift i stedet for dieseldrift vil ikke gi lavere nivå av driftsstabilitet eller regularitet.

#### **4. Teknologimodenhet:**

*Prosjektet skal kun vurdere tilgjengelige teknologiske løsninger som har høy grad av gjennomførbarhet for bruk på norsk jernbane. (tilgang på kjøretøyteknikk og tilgang på infrastrukturteknikk).*

Basert på analysen og konklusjonen i kapittel 8.5 er det dokumentert at konseptet er teknisk mulig for personkjøretøy (fremst motorvognsett) og godskjøretøy (lokomotiver). For godstogene er det lagt til grunn et konsept med batterivogn som er drøftet og bekreftet teknisk mulig fra kjøretøyprodusenter, men som ikke er testet i drift. Det er vurdert at konseptet vil ha lavere grad av teknologisk modenhet for slike batterivogner enn et konsept med batterier integrert i lokomotivet, men at det allikevel har tilstrekkelig grad av teknologisk modenhet for å kunne realiseres. Det vil ikke være problem med tilgang på kjøretøyteknikk og infrastrukturteknikk for å realisere konseptet, men den teknologiske modenheten påvirker hva slags robusthet og konsept for integrering av batteriene i kjøretøyet som vil være mulig.

#### **5. Interoperabilitet:**

*Løsningen må være vurdert mot behovet for interoperabilitet med Sverige for person- og godstoglinjer som går i den grenseoverskridende trafikken.*

Konseptet vil gi noen fordeler når det gjelder interoperabiliteten for den grenseoverskridende trafikken til Sverige, mens det i noen aspekter vil forutsetningene være de samme som med dagens dieseldrift.

Hel-elektrifiseringen av Solørbanen vil gi den fordelen at konvensjonelle elektriske lokomotiver kan trekke godstog fra Dovrebanen, via Hamar-Elverum-Kongsvinger, og videre til Sverige uten behov for ikke-elektrifisert drift. Dette gir fordeler for godsselskapene som da ikke trenger hybride kjøretøy for den trafikken, fordi banene i Sverige til stor del er elektrifisert og særlig baner med forbindelse til grensen.

For trafikken som kommer fra, eller går til, Rørosbanen, Raumabanen og Nordlandsbanen og kommer fra eller starter i Sverige så vil det allikevel være behov for batterikjøretøy for å kunne benytte del-elektrifiseringen. Samtidig vil løsningen ikke gi et forbud mot fortsatt bruk av diesellokomotiver for de godsselskapene som vurderer det som det beste alternativet for sin virksomhet.

#### **6. Standardisering:**

*Løsningen må kunne standardiseres i den forstand at løsningen(e) som velges kan bli brukt av alle relevante kjøretøy, og at det legges opp til at fremtidige kjøretøy også kan bruke løsningen(e) uten at det krever særlige tilpasninger og spesialløsninger for hvert kjøretøy.*

Som beskrevet i kapittel 8.5 så er det lagt til grunn et konsept som vil gjøre det mulig å bruke alle batterikjøretøyene på alle strekningene, mot bakgrunn av det er lagt til grunn standardiserte batteristørrelser for alle kjøretøyskategorier uansett toglinje. Det betyr også at kjøretøyene kan skiftes mellom banene uten at det resulterer i problem med energimengden i batteripakken. Det er heller ikke noen kjøretøyskategorier hvor konseptet er vurdert å ikke være realiserbart.

Dersom det blir besluttet en del-elektrifisering så vil det gi føringer for fremtidige anskaffelser av kjøretøy, fordi det vil da stille krav til rekkevidden for de kjøretøy som anskaffes. Det vil for hver anskaffelse kreves analyser av den spesifikke banen sammen med det spesifikke kjøretøyet som skal anskaffes for å vurdere om løsningen vil være kompatibel med del-elektrifiseringen

#### **7. Samfunnsikkerhet:**

*Sårbarheten i forhold til opprettholdelse av jernbanens samfunnsfunksjon må ikke få unødige eller uakseptable økninger. Vesentlig økt risiko for storulykke knyttet til jernbanen må ikke innføres.*

Konseptet vil resultere i endrede forutsetninger når det gjelder sårbarheten i forhold til opprettholdelse av jernbanens samfunnsfunksjon. Som beskrevet i kapittel 8.7 så vil det være en viss sårbarhet som det må



tas hensyn til knyttet til rekkevidden ved svært lave temperaturer eller mye snø som gjør fremføringen energikrevende. Det samme gjelder beredskap ved uforutsette hendelser som medfører at tog blir stående på batteridrift over tid. Relativt til referansealternativet med diesel vurderes konseptet ikke å være noe mer sårbar for ekstremtilfeller av norsk klima eller uforutsette hendelser. Det vurderes at denne sårbarhet vil i stor grad kunne håndteres i den daglige driften og med bruk av marginer ved planlegging av infrastruktur.

Utover dette så finnes det sårbarheter i strømforsyningen til de del-elektrifiserte strekningene, hvor denne kan falle ut som konsekvens av f.eks. at kontaktledningen rives ned eller at det oppstår en teknisk feil i matestasjonen. I motsetning til hel-elektrifisering (konsept 4, se kapittel 9.1.1) så vil batterikjøretøy ha mulighet å håndtere bortfall av en matestasjon gjennom å redusere hastigheten vesentlig, noe som vil gi lavere energiforbruk per tilbakelagt kilometer og gi mulighet for å klare turen til den påfølgende del-elektrifiseringen. Sett opp mot referansealternativet er det på dette detaljnivået ikke funnet grunnlag for at konseptet gir unødig eller uakseptabel økning av sårbarheten i forhold til opprettholdelse av jernbanens samfunnsfunksjon.

Det er heller ikke funnet grunnlag for at konseptet gir vesentlig økt risiko for storulykke. Dette drøftes i kapittel 8.6.

#### **8. Tilfredsstillende lover, forskrifter og annet førende regelverk:**

*Løsningen må tilfredsstillende minimumskrav i gjeldende norsk og europeisk regelverk, og være akseptabel for de aktører som er ansvarlige for sikkerhet og risiko ved driften, herunder driftssikkerhet, arbeidsmiljø og ytre miljø.*

Det finnes i dag standarder som er spesielt utviklet for jernbanekjøretøy med batteridrift, samt at det finnes jernbanekjøretøy som benytter ordinært kontaktledningsanlegg og batterier for fremdrift, som er testet og godkjent av tilsynsmyndigheter i andre europeiske land. Dette gir en indikasjon på at sikkerhet og tilfredsstillende av lover og forskrifter ved batteridrift er akseptabel, men innebærer ikke automatisk at kjøretøyene passer for de betingelsene som gjelder for jernbanen i Norge. Innføring av konseptet vil innebære risikovurderinger og utarbeidelse av beredskapsplaner og beredskap for den aktuelle driftsformen i norsk kontekst. Sett opp mot referansealternativet er det på dette detaljnivået ikke funnet grunnlag for at konseptet gir unødig eller uakseptabel økning av sårbarheten i forhold til opprettholdelse av jernbanens samfunnsfunksjon, eller vesentlig økt risiko for storulykke. Løsningen ser ut til å kunne tilfredsstillende minimumskrav i norsk og europeisk regelverk, og det er ikke funnet grunnlag for at konseptet ikke skal kunne være akseptabelt for driftssikkerhet, arbeidsmiljø og ytre miljø. Se kapittel 8.6.4.

#### **9. Kompatibilitet med dagens teknologi:**

*Løsninger basert på ny teknologi må kunne benyttes samtidig med dagens teknologiske løsning, slik at en smidig overgang til valgt konsept sikres.*

Etablering av kontaktledningsanlegg og anskaffelse av batterikjøretøy er ikke til hinder for fortsatt bruk av diesel som energibærer frem til anlegget er bygget og kjøretøyene er anskaffet og godkjent for trafikk.

# 9 Alternativ 4 – Elektrifisering

## 9.1 Beskrivelse av energibærer

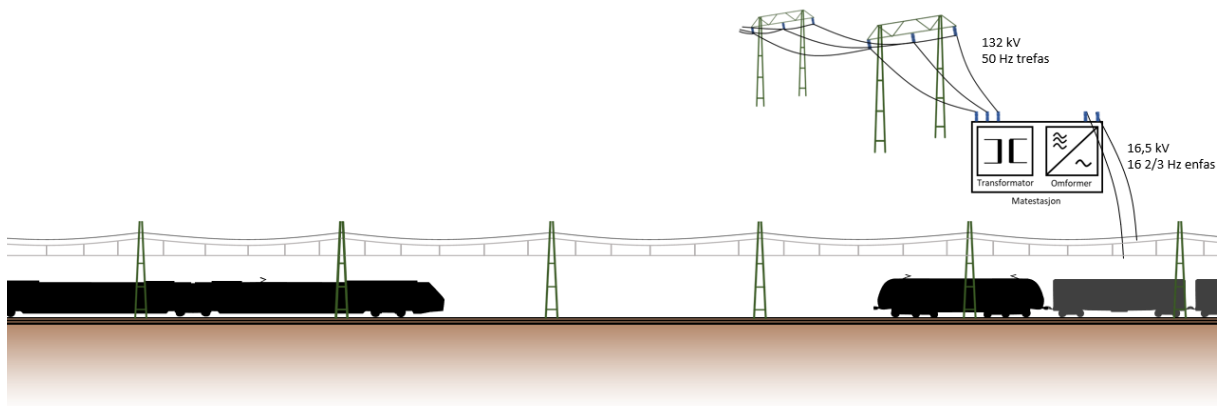
Elektrifisert jernbane, eller elektrisk jernbane, er baner som er utstyrt med et kontaktledningsanlegg.<sup>26</sup> Et kontaktledningsanlegg er et elektrisk høyspenningsanlegg der strøm forsynes til toget fra en kontaktråd (kobbertråd) som henger over skinnene. Togene er utstyrt med en strømvtager på taket som sleper langs kontaktråden og lager nødvendig kontakt mellom kjøretøy og kontaktledningsanlegg, og det overføres energi i form av strøm som brukes til å drive kjøretøyet.

Det er ingen lagring av energi til framdrift i toget, og det er den faste infrastrukturen som kontinuerlig forsyner kjøretøyet med nødvendig energi.

Kontaktledningssystemet er det mest brukte systemet for energiforsyning til jernbanekjøretøy i Norge, og utgjør om lag 66% av det nasjonale jernbanenettet.

Kjøretøyene som benyttes på elektrisk jernbane har en enkel, robust og velprøvd grunnkonstruksjon, som gir høy pålitelighet, lave vedlikeholdskostnader og høy energieffektivitet. Det at det ikke lagres energi i kjøretøyet er gunstig i et sikkerhetsmessig perspektiv, men det medfører utfordringer dersom det er avvik i strømforsyningen.

## 4 Elektrifisering



Figur 33 Illustrasjon av konsept 4

Elektrifisert jernbane har mange gode egenskaper, men det har også en vesentlig utfordring. Det er høye investeringskostnader knyttet til bygging av kontaktledningsanlegg som er i størrelsesordenen at det behøves en viss trafikk på banen for å gjøre det samfunnsøkonomisk lønnsomt å investere i kontaktledningsanlegg. For de banene som enda ikke er elektrifisert har dette vært en terskel for bruk av dette systemet.

### 9.1.1 Nærmere beskrivelse av det tekniske systemet

På elektriske jernbanestrekninger består banestrømforsyningen av omformerstasjoner og kontaktledningsanlegg. Matestasjonene til jernbane i Norge er vekselstrøm (AC)  $16\frac{2}{3}$  Hz, 15 kV spenning

<sup>26</sup> Beskrivelsen som følger er utformet på grunnlag av beskrivelsen av elektrifisering i NULLFIB Sluttrapport [27], s. 7.

og 600 eller 800 A strømbelastning<sup>27</sup>. Matestasjonene, også omtalt som omformerstasjoner, leverer normalt ut en spenning på 16,5 kV for å kompensere for spenningsfall som kan oppstå mellom matestasjon og kjøretøy. Den elektriske energien mates til kontaktledningsanlegget via omformerstasjoner og transformatorstasjoner. Matestasjonenes kapasitet og plassering langs jernbanenettet må tilpasses trafikkmengden, topografien, hastigheten og kjøretøyenes spesifikke behov.

Kontaktledningsanlegget hovedoppgave er å forsyne kjøretøyene med elektrisk energi i fart. Kontaktledningsanleggene består av kontaktråd, bæreline, master, elektriske brytere, kabler og liner. Kontaktråden overfører strøm til kjøretøyets strømvaktter. Kontaktråden henger over sporet i utliggere som er festet til master. På stasjoner eller strekninger med flere enn to spor, benyttes en fagverkskonstruksjon som henter åk på tvers av sporene som hengemaster og utliggere er plassert i. Kjøretøyets returstrøm overføres i skinner og returledere tilbake til omformerstasjoner.

Kontakttrådshøyde fra skinneoverkant til kontaktråd er 5,6 m. Denne avstanden benyttes på fri linje, det vil si ikke tunneler. I denne KVV er det lagt opp til en kontaktrådshøyde på 5,6 m på fri linje og 5,05 m i tunneler, og beskrives nærmere i kapittel 9.2.1. Spesielle tilfeller og andre høyder må sees på i senere planfaser.

Nyere kjøretøy kan generere elektrisk energi ved bremsing, som mates tilbake til kontaktledningsanlegget. Dette kalles regenerert strøm eller bremseenergi. Bane NORs målinger viser at 18-20 % av energien som hentes ut, mates tilbake. 18-20 % utgjør derfor et snitt for hele systemet. Hvor mye strøm som mates tilbake for en gitt avgang er varierende og avhenger blant annet kjørestil og vertikalkurvatur. Tilbakematingsprosent for tunge godstog ned bratte bakker, som ned Saltfjellet og fra Rana Gruber, vil kunne komme opp i 40 %.

## 9.2 Teknisk løsninger som er lagt til grunn i alternativanalysen

I dette underkapitlet beskrives bakgrunnen for ulike valg som ble tatt av tekniske løsninger for elektrifisering i tunneler, type transformatorstasjon og hvilken elektrisk systemtype som skulle anbefales.

### 9.2.1 Tekniske løsninger for elektrifisering av tunneler

Arbeidet som ble gjort med kostnadsestimering av del-elektrifisering i NULLFIB 1 og 2 viste at utvidelse av tunneler for etablering av kontaktledning utgjør en betydelig andel av kostnadene til elektrifisering. En høy andel av tunnelene på Nordlandsbanen, Raumabanen og Rørosbanen ble antatt å være for lave til at det vil være mulig å elektrifisere disse uten at man samtidig må gjennomføre tiltak for å utvide tunnelprofilen, og tilgjengelige data bekreftet dette. Ytterligere informasjon som har blitt innhentet i forbindelse med alternativanalysen bekrefter at tunnelprofilen må utvides for svært mange tunneler. Mulighetsstudien og alternativanalysen i KVV GREEN har dermed sett på ulike løsninger for å redusere kostnadene til utvidelse av tunneler og heving av bruer over jernbanen.

Følgende systemer er vurdert:

#### A Ordinært kontaktledningsanlegg med standard høyde

Dette legges også til grunn på fri linje, og i tunneler/under bruer med tilstrekkelige høyde. Se kapittel 9.1.1 for nærmere beskrivelse.

#### B. Dobbel kontaktråd/dobbeltspent kontaktråd i tunnel

Ved dobbel kontaktråd benyttes tunnelutliggere med fullisolerte utliggerrør. Løsningen gjør at kontaktråden kan henge i samme høyde som bærelinen vanligvis befinner seg, noe som reduserer systemhøyden, og dermed kravet til høyde i tunneler. Samtidig så har systemet mye tettere utliggere enn standard kontaktledningsanlegg, og dermed noe høyere byggekostnader. Ved dobbel kontaktråd er det lavere makshastighet (opp til 100 km/t, avhengig av strekket i kontaktråden)<sup>28</sup>. Løsningen medfører økt slitasje både på kontaktledning og strømvaktter.

<sup>27</sup> På Gardermobanen er det tillatt med opptil 900 A belastning

<sup>28</sup> Se *Kontaktledningsanlegg i eksisterende tunneler* av Foshaugen og Melgaard [28], s. 11 for nærmere beskrivelse. Se også *Jernbaneverket 2007 Kontaktledningsanlegg Kontaktledningssystem Dobbel kontaktråd Generell beskrivelse for prosjektering og bygging* [29]

### *C. Framdrift med batteri gjennom lave tunneler*

Kontaktledning legges i isolert kabel (eller tilsvarende) i tunnel eller utenom tunnelen, og framdrift skjer ved hjelp av et traksjonsbatteri om bord på toget på disse strekkene. Her senkes strømvtageren ned mens toget kjører gjennom tunneler som er for lave. Formålet er å spare kostnader til utvidelse av tunnelprofiler, samtidig som det meste av gevinstene ved hel-elektrifisering realiseres.

### *D. Strømskinne*

Strømskinne ble foreslått og vurdert i mulighetsstudien. Denne løsningen ble imidlertid forkastet som en egnet løsning for å redusere kostnader til elektrifisering av tunneler. Kontaktskinne har noen fordeler knyttet til bl.a. slitasje som gjør at denne løsningen benyttes i Oslo-tunnelen, selv om den er en dyrere løsning en standard kontaktråd. Disse fordelene er i mindre grad relevante på de enkeltsporede ikke-elektrifiserte banene. Strømskinne kan reduserer kravet til høyde i tunnel sammenlignet med standard kontaktledningsanlegg under noen forhold (bl.a. lavere spenningsnivå), men som følge av krav til avstand til isolator og klimatiske forhold som isdannelse i tunneler, er ikke det tilfellet ved bruk i Norge. Sett i sammenheng gjør dette at kontaktskinne ikke er egnet som en generell løsning for å redusere kostnader for elektrifisering av tunneler, og teknologien er ikke vurdert nærmere i alternativanalysen. Dette er ikke til hinder for at løsningen kan benyttes i senere faser, dersom det skulle vise seg å være hensiktsmessig i enkelte situasjoner.

Løsning A, B og C ble vurdert nærmere i alternativanalysen.

## **Metode**

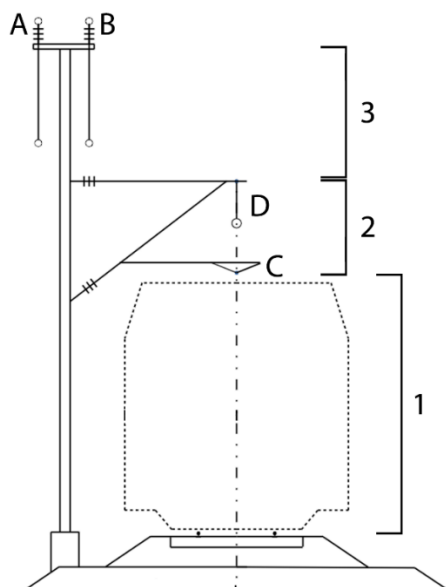
Vurderingen av hvilken løsning for tunnelene som skulle legges til grunn i alternativanalysen ble gjennomført etter følgende metode:

1. Fastsette krav til tunnelprofilen (høyder) med den aktuelle løsningen.
2. Identifisere høyder for infrastrukturen ved å gjennomføre simulering av den aktuelle profilen i Bane NOR Spesialtransports verktøy for å identifisere konflikter med de aktuelle profilene.
3. Kartlegge konflikter mellom den aktuelle profilen og infrastrukturen.
4. Vurdere kostnader og konsekvenser for gjennomførbarhet av den aktuelle løsningen som følge av de identifiserte konfliktene.

### *1 Krav til tunnelprofilen (høyder)*

Krav til tunnelprofilen med de ulike løsningene ble vurdert med utgangspunkt i Bane NORs tekniske regelverk og praksis. Det ble definert hvilke høyder løsning A og B ville stille krav til.

Det ble også gjort en vurdering av om løsning C med senkning av strømvtager ville stille andre krav til høyder enn i referansealternativet. Det ble konkludert med at ettersom strømvtageren normalt senkes ned til samme nivå som annet teknisk utstyr på taket på kjøretøyene, vil denne løsningen ikke være i konflikt med tunneler eller annen infrastruktur i referansealternativet.



Figur 34 Komponenter i kontaktledningsanlegget. A er negativleder, B er positivleder, C kontakttråd og D bæreline.

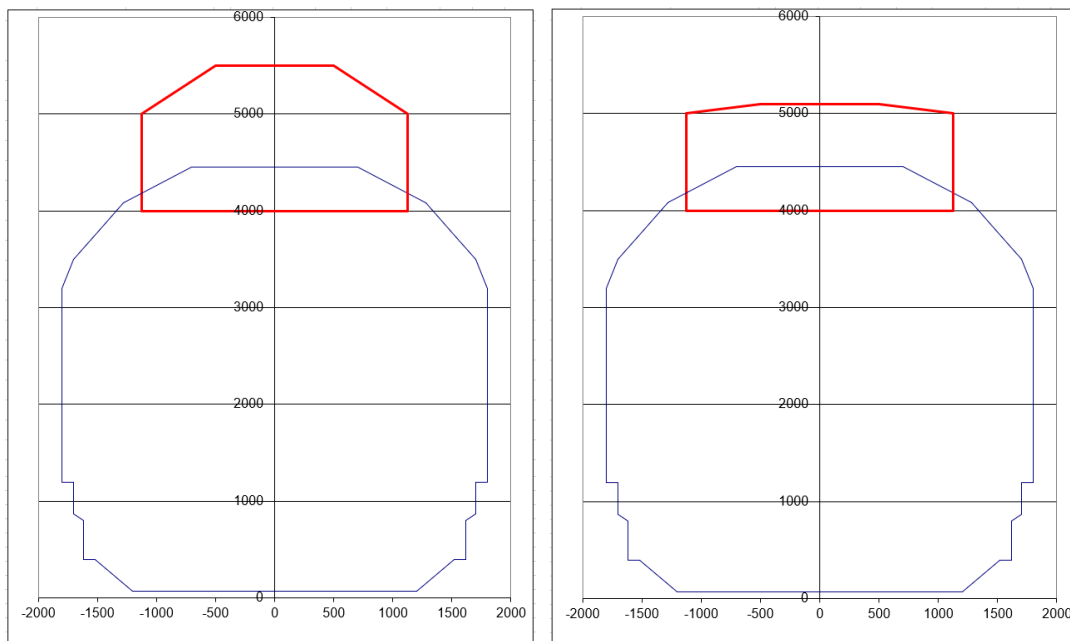
1 = høyde fra skinneoverkant til kontakttråd, 2 = systemhøyde for kontaktledning og 3 = isolasjonsavstand.

Tabell 37 Krav til høyder i tunnel med ulike kontaktledningssystemer

Krav til høyder med ulike løsninger i tunnel (mm)	Standard kontaktledning	Dobbel kontakttråd	Merknad
Minste ordinære høyde fra skinneoverkant til kontakttråd	5050	5050	Minste høyde iht. Bane NORs tekniske regelverk (TRV:00569). Fremdeles lavt, da 6,2 m er standard krav til høyde i tunneler og under bruer.
Systemhøyde for kontaktledning i tunnel (opp til bæreline, utliggere)	300	Ca. 100	Forutsetter maks hastighet på 120 km/t for standard kontaktledning, 100 km/t for dobbel kontakttråd. Forskjellen i høyde skyldes at den doble kontakttråden henges opp oftere slik at nedhengeret i kontakttråden blir mindre, noe som medfører flere hengemaster i tunnel.
Isolasjonsavstand (statisk), dvs. høyde fra spenningsførende del til tunneltak	150	150	Europeisk normkrav til statisk klaring for 15 kV-system, se EN 50119:2022.
Byggetekniske tiltak for beskyttelse av kontaktledning i tunneltaket, inkludert frostsikring.			Behovet for byggetekniske tiltak for beskyttelse av kontaktledning vil variere med forhold i tunnelen (bl.a. vanninntrengning) og vil plasseres iht. hvilke krav de ulike tekniske installasjonene har. Det er dermed ikke beregnet en standard ekstra høyde for dette, men forutsatt at ekstra strossing kan gjøres punktvis ved behov.
<b>Sum forutsatt minste ordinær høyde for kontakttråd</b>	<b>5500</b>	<b>5300</b>	

Nærmere avklaring med Bane NOR har stadfestet at det er ønskelig at Konseptvalgutredningen legger en generell forutsetning om minste høyde på 5,05 m til grunn, for å være i tråd med gjeldende regelverk, bl.a. kravet til TSI Energi. Det er mulig å søke om dispensasjon fra teknisk regelverk for å kunne bygge kontaktråd 4,85 meter over skinneoverkant, men det arbeides i dag for å fjerne slike begrensninger fra andre steder i nettet, og det er ikke en ønskelig eller aktuell løsning på nye elektrifiserte strekninger. Videre analyser er dermed gjennomført med utgangspunkt i minste ordinære høyde fra skinneoverkant til kontaktråd, dvs. 5,05 meter.

For ordinært kontaktledningsanlegg gir det et minste krav til tunnelprofilen på 5,5 meter over skinneoverkant. For dobbel kontaktråd vil minste krav være 5,3 meter.



Figur 35 Høydeprofil for henholdsvis løsning A Standard kontaktledning og løsning B dobbel kontaktråd. Arealbehov for strømvagter og kontaktledningssystemer er markert i rødt.

## 2 Identifisere høyder

For å identifisere høyder for infrastruktur over jernbanen, og da spesielt tunneler, overgangsbruer og fagverksbruer, ble to datakilder fra Bane NOR benyttet. Det første var tidligere overlevert informasjon om infrastrukturen, som ble benyttet i NULLFIB 1 og NULLFIB 2, der høyder framkom for noen objekter, men ikke for alle. Det andre datasettet var simuleringer av de fire jernbanestrekningene med samme verktøy som benyttes for å avdekke konflikter ved spesialtransport på jernbanen. Disse simuleringene dekket alle banestrekningene. Dette datasettet inneholdt imidlertid ikke info om høyder, kun informasjon om konflikter med de aktuelle profilene.

## 3 Kartlegge konflikter mellom infrastruktur og elektrifisering

På grunnlag av de utarbeidede profilene og infrastrukturdataene, er det identifisert hvilke objekter som vil være for lave ved en framtidig elektrifisering av banen. Det er kun vurdert konflikter i forbindelse med kjent infrastruktur (overgangsbruer, tunneler og fagverksbruer). Det ble registrert noen avvik i informasjon om høyder/konflikter i de to datasettene. De fleste av disse er ikke oppklart, og det er regnet behov for ombygging dersom det er registrert konflikt i minst ett datasett.

## 4 Vurdere kostnader og konsekvenser for gjennomførbarhet av de ulike løsningene

Den gjennomførte analysen viste at det vil være konflikt mellom elektrifisering og tunnelprofilen for en svært høy andel av tunnelene på de ikke-elektrifiserte strekningene, ca. 94 % med standard kontaktledning og 91 % med dobbel kontaktråd. Den antatte kostnadsforskjellen ble estimert til ca. 150 mill. kr. Relativt til de totale kostnadene ved elektrifisering er dette en svært liten besparelse. Sett i sammenheng med driftsmessige ulemper (økt slitasje og begrenset makshastighet) er løsning B dobbel kontaktråd dermed

ikke egnet som en generell løsning for å redusere kostnader for elektrifisering av tunneler, og teknologien ble ikke vurdert nærmere i alternativanalysen. Dette er ikke til hinder for at løsningen kan benyttes i senere faser, dersom det skulle vise seg å være hensiktsmessig i enkelte situasjoner (f.eks. i korte tunneler med relativt lite trafikk og manglende 20 cm klaring i tunnelprofilen).

Analysen viste videre at det høye antallet tunneler som var for lave, ville gjøre løsningen C med batteri gjennom tunneler som er for lave, lite realistisk å gjennomføre i praksis. Bakgrunnen for dette er at det tar ca. 15 sekunder å gjennomføre hele den tekniske operasjonen med å senke strømvogter opp eller ned. Med et sikkerhetstillegg på 15 sekunder til, samt en vurdering av at toget bør kunne kjøre på strøm fra kontaktledningsanlegget i minst 2 minutter før strømvogteren må senkes ned igjen for at det skal være hensiktsmessig å rette den opp. Ved en hastighet på 100 km/t innebærer det at det må være minst 3,3 km mellom tunneler som er for lave, for at det er relevant å sette opp kontaktledningsanlegg på strekningen mellom tunnelene. Analysen viste at dette ville gi såpass store avstander mellom de elektrifiserte strekningene, at løsningen ikke lenger kunne gjennomføres med et relativt moderat batteri. Tunneltettheten er rett og slett for høy, spesielt på Nordlandsbanen, hvor det blir strekninger opp mot 50 km der togene knapt får ladet underveis. Det vil da være behov for ganske store batterier, og de aktuelle kjøretøyene blir en spesialvariant som må designes og produseres kun for bruk i Norge. Løsningen utgikk dermed fra nærmere vurdering som en variant av hel-elektrifisering, og det henvises til konsept 3 Batteri for nærmere vurdering av løsninger som benytter mellomstore og store batteripakker om bord togene som energikilde.

Konklusjonen er at standard kontaktledning legges til grunn i det videre arbeidet i konsept 4 Elektrifisering i KVV GREEN, samt for del-elektrifiseringen i konsept 3 Batteri og konsept 2b Hydrogen med del-elektrifisering. Dobbelt kontaktråd og andre teknologier som gjør det mulig å redusere omfanget av tunneler og bruer som må bygges om kan og bør vurderes nærmere i eventuelle senere faser av et elektrifiseringsprosjekt, i tråd med de utfordringer og muligheter som kjennetegner hver del av infrastrukturen.

Det er forutsatt at elektrifiseringen vil gjennomføres som skiftarbeid (bruk av hvite tider) for å gi minst mulig forstyrrelse av trafikken i anleggsperioden.

### **9.2.2 Vurdering av transformatorstype**

For elektrifisert jernbane måtte det tidligere tas et valg om det skal bygges kontaktledningsanlegg med sugetransformator (BT) eller autotransformator (AT). AT-system er nå standarden for elektrifisering av jernbane i Norge, og BT brukes kun på tidligere elektrifiserte strekninger. I Norge var det vanlig å bygge BT-systemer, men denne teknologien har lav overføringskapasitet i forhold til effektbehovet til moderne kjøretøy og krever kort avstand mellom omformerstasjonene. Derfor har Bane NOR gått over til å bygge AT-systemer ved ny elektrifisering eller oppgradering av gamle kontaktledningsanlegg.

Autotransformatorsystemer forsterker strømforsyningen og kan øke avstanden mellom matestasjonene opp til ca. 120 km, evt. lengre dersom trafikkmengde og stigningsforhold på banen er lave<sup>29</sup>.

Autotransformatorer står plassert om lag hver 10. km langs banen og AT-systemet reduserer impedansen mellom matestasjon og tog til om lag 1/4 sammenlignet med konvensjonelt kontaktledningsanlegg. Dette gir redusert spenningsstap og forbedrer energitilførselen til kjøretøyene.

### **9.2.3 Vurdering av spenning og frekvens på kontaktledningsanlegget**

Som del av utformingen av elektrifiseringskonseptet er det også gjort en vurdering av fordelere og ulemper ved å innføre et 50 Hz 25 kV system for strømtilførsel, istedenfor dagens 16,7 Hz 15 kV. De faglige momentene som inngikk i vurderingen, samt konklusjonen, beskrives i det følgende.

50 Hz 25 kV er et system for strømtilførsel i mange Europeiske land, spesielt for høyhastighetsbaner. En av fordelene med 50 Hz strømforsyning på jernbanen, er at det er samme frekvens som på strømmen i det nasjonale strømnettet. For å unngå problemer med asymmetri i strømforsyningsnettet, vil bruk av 50 Hz på jernbanen allikevel kunne kreve omformerstasjoner, og løsningen vil dermed ikke nødvendigvis være kostnadsbesparende for infrastrukturen. Dette skyldes at ved bruk på de ikke-elektrifiserte banene i Norge,

---

<sup>29</sup> I Sverige benyttes f.eks. avstander opp til 160 km. Hva som er gjennomførbart i drift varierer dermed.

vil det være lav trafikkbelastning og begrenset kortslutningsytelse i overliggende nett, noe som ikke er situasjonen andre steder i Europa der 50 Hz brukes uten omformerstasjoner. Videre vil økt spenning (fra 15 kV til 25 kV) øke kravet til isolasjonsavstander, bl.a. mot tunneltak, og dermed medføre økt behov for ombygging av infrastruktur over sporet, sammenlignet med 15 kV. Mange nyere kjøretøy kan kjøre på begge typer system, men det vil sannsynligvis ikke gjelde en del eldre kjøretøy. Innføringen av 50 Hz 25 kV vil kreve etableringen av et nytt kompetansemiljø i Bane NOR.

Med bakgrunn i ovenstående momenter, og spesielt forventningen om økte infrastrukturkostnader ved bruk av 50 Hz 25kV, legger KVVU-en til grunn en videreføring av samme frekvens og spenning som på eksisterende elektrifiserte strekninger i Norge og Sverige, dvs. 16,7 Hz 15 kV. Fordeler og ulemper ved å velge 50 Hz 25 kV system er også beskrevet tidligere, bl.a. i NULLFIB2<sup>30</sup>.

### 9.3 Tiltak i infrastrukturen

Konsept 4 omfatter hel-elektrifisering av alle de ikke-elektrifiserte strekningene. Vurderingene som er gjennomført i prosjektet viser at elektrifisering vil kreve betydelig investering i ny infrastruktur og i ombygging av eksisterende infrastruktur:

1. Etablering av kontaktledningsanlegg og annet som gir strømforsyning til togene. Dette anlegget består av selve kontaktledningsanlegget (herunder kontakttråd, bæreline, utliggere, stopler, m.m.), omformerstasjoner (med to omformere hver) og høyspentledning for å koble omformerstasjonene til det nasjonale strømmettet.
2. Tilpasning av infrastruktur over banen til elektrifisering. Dette omfatter utvidelse av tunnelprofiler som er for lave, heving av overgangsbruer over jernbanen, samt utskiftning av fagverksbruer på jernbanen som er for lave. I tillegg må alle bruer over jernbanen sikres og isoleres.

Her følger en kort beskrivelse av omfanget av tiltak i infrastrukturen, samt en tabell som oppsummerer omfanget for alle banene. Senere i kapitlet kommer en mer inngående drøfting av forutsetninger, metoder og forbehold knyttet til hver type tiltak.

De aktuelle banene har ulik lengde, og er til sammen over 1300 km lange. Omfanget av tiltak for etablering av strømforsyning til kjøretøyene er i stor grad en funksjon av banenes lengde, der Nordlandsbanen er den absolutt lengste, om lag 730 km. Men også Røros- og Solørbanen er til sammen om lag 480 km. Det gir behov for svært mange kilometer kontaktledning. Raumabanen er betydelig kortere, med bare ca. 114 km. Ekstra spor på stasjoner og kryssingsspor utgjør mellom 3 og 6 %.

For alle baner er det mulighet for mating av strøm inn på banen fra eksisterende omformere på tilstøtende strekninger. På Nordlandsbanen er ny omformerstasjon på Hell dimensjonert for å forsyne banen med strøm helt opp til Steinkjer, evt. litt lenger. Ut over dette må det imidlertid bygges 6 nye omformerstasjoner for å forsyne banen helt opp til Bodø, noe som potensielt kan reduseres til 5. For Raumabanen er det forutsatt forsyning fra både eksisterende omformerstasjon på Dombås og ny omformerstasjon rett før Åndalsnes. På Røros- og Solørbanen, som har tre tilkoblingspunkter til elektrifiserte strekninger, er det mulig å forsyne banen med strøm fra eksisterende omformerstasjoner på Hamar, Kongsvinger og Lundamo, og dermed kun behov for å bygge to nye omformerstasjoner.

I tillegg kommer behovet for ombygging av eksisterende infrastruktur. Også her peker Nordlandsbanen seg ut som den banen som krever mest omfattende tiltak. Dette skyldes delvis banens lengde, men også andre forhold. Andelen av banen med tunneler, relativt til banens lengde, er mye høyere på Nordlandsbanen. Den har også litt flere bruer per kilometer, men det er behov for heving/ombygging av en lavere andel av bruene på Nordlandsbanen, sammenlignet med de andre banene. I tillegg er det behov for skjerming og andre tiltak på overgangsbruer og fagverksbruer, noe som gjelder alle bruer og fagverksbruer (som kan klatres på). Dette er mange tiltak, men kostnadmessig utgjør det kun en liten andel av den totale investeringen.

Etter at usikkerhetsanalysen ble gjennomført, har konseptet gjennomgått ytterligere modning og ny informasjon har tilkommet. Dette har ført til noen endringer i det forventede behovet for ny infrastruktur.

Behovet for infrastruktur langs de ulike banene er oppsummert i følgende tabell. Tabellen er konsistent med det som ble lagt til grunn i usikkerhetsanalysen. Det er i tillegg utarbeidet et underlagsnotat om

---

<sup>30</sup> Se «NULLFIB2 Nullutslipp – batteridrift på jernbanen hovedrapport» [24], s. 29-30. Se også NSBs rapport «25 kV, 50 Hz matesystem ved NSB. Videre utredning» [30].



infrastrukturforutsetninger i KVV GREEN som beskriver forutsetninger knyttet til hvert enkelt objekt i de ulike konseptene.

Tabell 38 Samlet oversikt over infrastrukturtiltak i konsept 4, per strekning

	Nordlands- banen	Raumabanen	Røros- og Solørbanen	Samlet
Omformerstasjoner, inkl. tilkobling til nasjonalt strømnnett	6 stk.	1 stk.	2 stk.	9 stk.
Kontaktledningsanlegg	694 km	114 km	479 km	1287 km
Kontaktledningsanlegg på stasjoner og kryssingsspor	31 km	4 km	14 km	48 km
Utvidelse av tunnelprofil	44,6 km, 123 stk.	2,2 km, 6 stk.	1,5 km, 6 stk.	48,3 km, 135 stk.
Utvidelse av kun tunnelportal	5 stk.	0 stk.	0 stk.	5 stk.
Ombygging av gang- og sykkelbruer	6 stk.	0 stk.	6 stk.	12 stk.
Ombygging av veibruer	14 stk.	2 stk.	17 stk.	33 stk.
Skjermende tiltak på overgangsbruer	98 stk.	12 stk.	47 stk.	157 stk.
Erstatning av fagverksbru	3 stk.	1 stk.	2 stk.	6 stk.
Tilrettelegging av fagverksbru	8 stk.	0 stk.	1 stk.	9 stk.



Figur 36: Banestrekninger som forutsettes elektrifisert i alternativet.

### 9.3.1 Omformerstasjoner

De forutsettes AT-system med 120-130 km mellom omformerstasjonene, forutsatt mating fra begge sider for hel-elektrifiseringskonseptet. For del-elektrifisering forsøkes omformeren plassert relativt sentralt i den aktuelle strekningen, med mindre andre hensyn tilsier at det ikke er ønskelig (spesielt nærhet til nasjonalt strømmnett). Dette for å redusere spenningsfall og for å gi bedre elektriske forutsetninger for togene. Forutsetningen om 120 km mellom stasjonene tøyes noe med den plasseringen som legges til grunn i denne fasen av konseptvalgutredningen, og bør vurderes nærmere i det videre. På strekninger med lav trafikk og lite helninger kan lengre avstander aksepteres, og potensielt redusere antallet omformerstasjoner.

Det forutsettes bruk av restkapasitet i eksisterende omformere, der dette er kjent. Dette gjelder Hell, Hamar, Kongsvinger, Lundamo og Dombås omformerstasjoner, som beskrevet i det følgende.

Det forutsettes bruk av nye, statiske omformere i nye omformerstasjoner. Effektbehov for omformerstasjon er 2x18 MVA eller lavere. Ettersom 18 MVA er det som er tilgjengelig på markedet, forutsettes det bruk av denne typen omformere. Det er to omformere per stasjon, for å sikre redundans i strømforsyningen. Bane NOR har et overskudd av eldre roterende omformere som kan plasseres på Rørosbanen eller Raumabanen. Dette bør undersøkes nærmere i videre arbeid, og kan potensielt redusere kostnadene til elektrifisering (anslagsvis med ca. 60 mill. per omformerstasjon).

#### *Nordlandsbanen*

Omformerstasjoner på Nordlandsbanen er plassert med utgangspunkt i en ca. avstand mellom omformerstasjoner på 120-130 km. For å sikre mating av strøm fra begge sider av alle delstrekningene, er det ønskelig med en omformerstasjon plassert nært Bodø stasjon, om mulig (med hensyn til kobling til nasjonalt strømmnett og ønske om å begrense inngrep i Bodø sentrum). Avstanden mellom Hell og Bodø er ca. 700 km langs jernbanen, noe som gir behov for 6 omformerstasjoner med en gjennomsnittlig avstand på ca. 116 km. For å sikre nærhet til nasjonalt strømmnett tøyes dette opptil 150 km på ett strekk, som kan være akseptabelt på strekninger uten høye stigningsforhold.

Det er i denne fasen av arbeidet forutsatt samme plassering av omformerstasjoner i konsept 4 Elektrifisering og konsept 3 Batteri. Med hel-elektrifisering kan det åpnes andre muligheter for plassering av omformerstasjoner enn ved del-elektrifisering. Det avhenger av hvor og i hvilken grad det er nærføring mellom nasjonalt strømmnett og jernbanen. I denne fasen legges det imidlertid til grunn de samme plasseringene som for del-elektrifisering. Eventuell optimalisering og nærmere utredning av plasseringene må utredes i en senere fase.

Dersom man forutsetter ca. 130 km mellom omformerstasjonene og ensidig mating av de siste 50 km inn mot Bodø, kan det kanskje være tilstrekkelig med 5 omformerstasjoner. Ulike løsninger som gjør det mulig å redusere kostnadene bør vurderes nærmere i eventuelt videre arbeid med hel-elektrifisering av Nordlandsbanen i senere faser. I KVVU GREEN er det ønskelig å legge til grunn en standard løsning, og det forutsettes dermed behov for 6 omformerstasjoner på Nordlandsbanen i denne fasen.

Følgende tabell beskriver en anslagsvis plassering. Det er ønskelig med plassering nærmest mulig jernbanen, med nærhet til nasjonalt strømmnett med tilstrekkelig kapasitet, samt minst mulig inngripen i bebyggelse, sårbar natur, grunnforhold (lite sprenging og ikke kvikkleire), osv. Det presiseres at disse plasseringene bør anses som svært foreløpige. Det henvises til Underlagsnotat om infrastrukturforutsetninger i KVVU GREEN for nærmere detaljer om foreløpig plassering av omformerstasjoner.

Tabell 39 Omformerstasjoner på Nordlandsbanen, konsept 3 og 4

Km.	Ca. sted	Merknad
Ca. 125	Steinkjer	2 km nord for Steinkjer stasjon.
Ca. 260	Tunnsjødal	Fra 66 kV i Tunnsjødal transformatorstasjon vil det være behov for ca. 4,5 km 66 kV kraftledning frem til jernbanen. Kapasiteten i Tunnsjødal transformatorstasjon er god med 420 kV tilknytning. Den lange kraftledningen vil være kostnadsdrivende og tidskrevende mht. Tillatelser. Videre nordover fra Tunnsjødal finnes det få alternativer innen rimelig avstand.
Ca. 407	Mosjøen	145 kV Mosjøen transformatorstasjon er et sterkt punkt i kraftnettet. Ved det industrielle baneområdet rett øst for stasjonen er det plass til å kunne etablere omformer.
Ca. 520	Storforshei	Forsyning fra 132 kV Ørtfjellvegen transformatorstasjon ved Storforshei nord for Mo i Rana. vil kreve etablering av ca. 1 km kraftledning parallelt med eksisterende 132 kV kraftledning tilbake til jernbanen for etablering av omformerstasjon nær Bjørnheia.
Ca. 650	Rognan	132 kV Rognan transformatorstasjon er i umiddelbar avstand til jernbanen
Ca. 725	Tjønndalen	132 kV Tjønndalen transformatorstasjon ligger i umiddelbar nærhet til jernbanen og synes å ha god mulighet og kapasitet for utvidelse, samt plass til nærliggende omformerstasjon. Unngår behovet for krevende plassering i Bodø.

#### Omformerstasjon Raumabanen

Det legges til grunn én ny omformerstasjon i nærheten av Åndalsnes, ved Grytten, rett ved jernbanesporet. Sammen med omformerstasjonen på Dombås gir dette tosidig mating på mesteparten av linjen. Plasseringen er felles for alle konsepter.

Raumabanen er ca. 115 km lang, og kan muligens forsynes med strøm kun fra omformerstasjonen på Dombås. Det er imidlertid noe som krever grundig utredning av belastning over døgnet, spenningsforhold og konsekvensen av eventuelle feil på kontaktledningsanlegget.

Tabell 40 Omformerstasjon på Raumabanen, alle konsepter

Km.	Ca. sted	Merknad
Ca. 450	Grytten	132 kV Grytten transformatorstasjon. Ca. 6 km utenfor Åndalsnes stasjon.

#### Omformerstasjoner på Røros- og Solørbanen

For å identifisere behovet for omformerstasjoner i forbindelse med elektrifisering av Røros- og Solørbanen er det hensiktsmessig å dele banene i to strekninger: Hamar-Elverum-Kongsvinger, og Elverum-Støren.

For strekningen Hamar-Elverum-Kongsvinger så vil ny omformerstasjon som er under bygging på Hamar være dimensjonert for å håndtere elektrifisering av hele denne strekningen, sammen med eksisterende omformerstasjon på Kongsvinger. Det er med andre ord ikke behov for nye omformerstasjon for å forsyne denne strekningen med strøm.

For strekningen Elverum-Støren, så vil også ny omformerstasjon på Hamar bidra med strømforsyning et stykke nord for Elverum. Videre kan eksisterende omformerstasjon på Lundamo forsyne nordre del av Rørosbanen. Det gir behov for to nye omformerstasjoner på Rørosbanen mellom Elverum og Støren. Disse kan plasseres på Koppang og Tolga, som beskrevet under. Avstandene mellom omformerstasjonene er litt

over 120 km, men det vurderes som akseptabelt i lys av banen er relativt lite trafikkert. Ved elektrifisering kan trafikkmengdene øke som følge av at lavere kostnader gjør det attraktivt å kjøre flere godstog (både kombitog og tømmerstog) på Røros- og Solørbanen, noe som må tas i betraktning i videre utredninger av akseptable avstander mellom omformerstasjonene.

Plasseringen av omformerstasjonene på Rørosbanen er forskjellig i de ulike konseptene.

Tabell 41 Omformerstasjoner på Røros- og Solørbanen i konsept 4

Km.	Ca. sted	Merknad
Ca. 247	Koppang	Rett sør for Koppang sentrum. Ca. 1 km kraftledning fra 66 kV Koppang transformatorstasjon.
Ca. 370	Tolga	Tilkobling til 132 kV Tolga transformatorstasjon, nordøst for Tolga stasjon.

### 9.3.2 Kontaktledningsanlegg

Behovet for kontaktledningsanlegg er beregnet på bakgrunn av antall kilometer per bane, samt spor på stasjoner og kryssingsspor. Behovet for elektrifisering av spor i avvik (spor som ikke er hovedspor på stasjoner og kryssingsspor) er beregnet med utgangspunkt i stasjonenes lengde og antall spor. Dette er ganget opp med en faktor på 1,4 for å håndtere økt sporlengde i avvik samt økt kompleksitet i anlegget i forbindelse med estimeringen av kostnader. Dette er en videreføring av praksis fra NULLFIB1<sup>31</sup>. Tabell 32 viser et anslag for kilometer spor i avvik før oppjustering med faktor 1,4.

Tabell 42 Kilometer kontaktledningsanlegg per banestrekning i konsept 4

	Nordlands-banen	Raumabanen	Røros- og Solørbanen	Samlet
Kontaktledningsanlegg	694 km	114 km	479 km	1287 km
Kontaktledningsanlegg på stasjoner og kryssingsspor	31 km	4 km	14 km	48 km
Sum kontaktledningsanlegg	725 km	128 km	492 km	1335 km

Innenfor mer komplekse stasjonsområder, stasjoner som benyttes for hensetting, og stasjoner med godsterminaler i bakkant (slik som f.eks. Åndalsnes) forventes det å være behov for mer inngående vurdering av akkurat hvilke spor som ønskes elektrifisert enn det som er gjort her. Resultatene som vises i Tabell 32, viser et overordnet anslag, som fanger størrelsesorden av elektrifisering av stasjoner og kryssingsspor for hver av banene.

Estimatet omfatter ikke elektrifisering av terminaler og sidespor, og skiftebevegelser innenfor disse områdene forutsettes løst med andre energibærere enn kontaktledning, f.eks. batteridrevne skiftelokomotiv med stasjonær lading og/eller et lite skiftet batteri på kjøretøy der det er hensiktsmessig for driften. Kostnader til dette er ikke medregnet i konsept elektrifisering.

### 9.3.3 Utvidelse av tunnelprofil

Som beskrevet tidligere, er det behov for heving av tunnelprofilen for svært mange av tunnelene på de ikke-elektrifiserte banene. Datagrunnlaget og metoden som ble benyttet for vurdering av konflikt mellom profilen og elektrifisering er beskrevet nærmere i kapittel 9.2.1. Det henvises til Underlagsnotat om infrastrukturforutsetninger for beskrivelse av vurderingen for hver enkelt tunnel.

For å håndtere det at enkelte tunneler har støpt portal i endene som er lavere enn resten av tunnelen (fjelltunneler), er det sjekket for konflikter i åpningen av tunnelen. Dersom det kun er identifisert konflikt i

<sup>31</sup> Se NULLFIB1 Delrapport 3 del-elektrifisering og infrastrukturiltak [26], bl.a. s. 23.

åpning av en tunnel, er det forutsatt utvidelse av støpt portal, med 20 meter i hver ende. Det gjelder 5 tunneler på Nordlandsbanen.

Analysen viser at det vil være behov for å bygge om alle tunneler på Raumabanen og Rørosbanen, og nesten alle på Nordlandsbanen. Vurderingen er gjennomført på grunnlag av et relativt overordnet datasett, og det er mulig at det faktiske behovet for å bygge om tunnelene vil være lavere. Den totale summen vises i Tabell 24, nedenfor. For å si noe mer konkret og presist om behovet for å bygge om tunneler, vil det være behov for mer inngående vurdering av den enkelte tunnel, bl.a. for å avdekke om den er gjennomgående for lav, eller om det kun er enkelte punkter inne i tunnelen som er lave, vurdere fjellets beskaffenhet, m.m. Slike vurderinger er ikke gjennomført i KVV-en.

Dersom det kun er behov for litt mer høyde i tunnelen, er det et mulig alternativ å senke sporet, forutsatt at det kan gjennomføres med eksisterende underbygning. Slike løsninger er ikke forutsatt i denne fasen av arbeidet, men vil være en naturlig del av videre utredning.

Tabell 43 Sum av tunneltiltak (km og antall) i konsept 4 sammenlignet med tunneler totalt, per strekning

	Nordlands-banen (Stjørdal-Bodø)	Raumabanen	Røros- og Solørbanen	Samlet
Utvidelse av tunnelprofil	44,6 km, 123 stk.	2,2 km, 6 stk.	1,5 km, 6 stk.	48,3 km, 135 stk.
Utvidelse av kun tunnelportal	5 stk.	0 stk.	0 stk.	5 stk.
Tunneler totalt, km	48,1 km	2,2 km,	1,5 km,	51,8 km
Antall	156 stk.	6 stk.	6 stk.	168 stk.

Eventuelle konflikter med rasoverbygg og snøoverbygg er ikke vurdert. Se også omtale av tunneler i nærheten av stasjoner og planoverganger i følgende delkapittel.

### 9.3.4 Ombygging/heving av overgangsbruer

Behovet for ombygging, heving eller nybygg av overgangsbruer over jernbanen er vurdert etter samme metode som for tunneler, og med de samme datakildene. Resultatene viser at det vil være behov for å bygge om bruer på alle baner, men med en høyere andel på Raumabanen og Røros- og Solørbanen.

Det er avdekket noen konflikter mellom de to datakildene som er benyttet (registrert konflikt i ett datasett, men ikke det andre, eller vice versa). Så lenge ett av datasettene tilsier at bruene er for lav, er det medregnet behov for ombygging av den aktuelle bruene. I videre arbeid med elektrifisering vil nærmere undersøkelse og vurdering av behovet for å bygge om bruer på de ikke-elektrifiserte banene være viktig for å øke sikkerheten i anslaget.

Det er beregnet behov for skjerming av alle registrerte bruer på strekningen, slik at ingen som bruker bruene skal kunne komme i kontakt med kontaktledningsanlegget som går under.

Vurderingen som er gjort for den enkelte bru er nærmere beskrevet i Underlagsnotat for infrastrukturforutsetninger. Oversikt over totale antall broer som må bygges om per bane er gjengitt i tabellen som følger.

Tabell 44 Oversikt over overgangsbruer som må bygges om i konsept 4, per strekning

	Nordlands-banen	Raumabanen	Røros- og Solørbanen	Samlet
Ombygging av gang- og sykkelbruer	6 stk.	0 stk.	6 stk.	12 stk.
Ombygging av veibruer	14 stk.	2 stk.	17 stk.	33 stk.
Skjermende tiltak på overgangsbruer	98 stk.	12 stk.	47 stk.	157 stk.

Antall overgangsbruer totalt	98 stk.	12 stk.	47 stk.	157 stk.
------------------------------	---------	---------	---------	----------

Estimatet av antallet overgangsbruer som må heves eller bygges på nytt tar utgangspunkt i at høyde under bruene må være minst 5,5 meter. Det er ca. 50 meter mellom hver kontaktledningsstolpe, og midt mellom disse vil kontaktledningen henge noe lavere enn rett ved stolpen. Det kan dermed være mulig å unngå å måtte bygge om enkelte bruer som er lavere enn 5,5 meter dersom strekningen gjør det mulig å plassere kontaktledningsstolpene slik at kontaktledningen er på sitt laveste punkt under bruene. Dette må vurderes nærmere i senere faser.

For både tunneler og bruer er det beregnet behov for en høyde på 5,5 meter over skinneoverkant for å unngå at kontaktledningsanlegget kommer for nærme tunneltaket eller undersiden av bruene. Ordinær høyde for kontaktråden på fri linje er 5,6 meter (med en bruhøyde på 6,2 meter), og denne må senkes svært gradvis ned mot 5,05 meter (med bruhøyde på 5,5 meter), over ca. 500 meter. Hvor gradvis kontaktråden må senkes avhenger av hastighetsprofilen. Estimatet som foreligger for elektrifisering i konsept 4, forutsetter at det vil være mulig å senke kontaktråden før bruer og tunneler.

På stasjoner med passasjerutveksling og planoverganger er det imidlertid krav om at kontaktråden har en høyde på 5,6 meter over skinneoverkant. Det er identifisert flere tilfeller der bruer og tunneler ligger nærmere enn 500 meter. Ettersom den primære datakilden for konflikt med tunnelprofilen ikke inneholder informasjon om aktuell høyde, kun om det er registrert en konflikt, er det i denne fasen av arbeidet ikke mulig å anslå konsekvensen av dette, annet enn at det kan medføre noe økning i behovet for å heve bruer spesielt (ettersom de fleste tunneler allerede er forutsatt å måtte utvides).

Tabell 45 Bruer og tunneler mindre enn 500 m fra stasjoner eller planoverganger, per strekning

	Nordlands-banen (Stjørdal-Bodø)	Raumabanen	Røros- og Solørbanen	Samlet
Bruer mindre enn 500 m fra stasjoner eller planoverganger	44	3	23	70
Tunneler mindre enn 500 m fra stasjoner eller planoverganger	20	2	4	26

### 9.3.5 Ombygging av fagverksbruer på jernbanen

Det er identifisert en del lukkede fagverksbruer på de aktuelle strekningene som er for lave for kontaktledningsanlegg. Det er forutsatt at disse byttes ut med ny jernbanebru i samme trasé. For beskrivelse av hva som er forutsatt for den enkelte bru, henvises det til Underlagsnotat for infrastrukturforutsetninger. Det er antatt at fagverksbruene rett nord for Steinkjer er vernet, og for denne bruene er det forutsatt flytting av eksisterende fagverksbru til ny og egnet beliggenhet, og etablering av en ny jernbanebru i eksisterende trasé. Det er i tillegg beregnet behov for skjerming av fagverksbruene.

For fagverksbruer kortere enn 60 meter kan det være mulig å unngå å måtte bytte dem ut. Dersom bjelkene over bruene ikke er for lave, sporet er relativt rett på strekningen, og det er mulig å tilpasse plasseringen av kontaktledningsstolper, kan det være mulig å la kontaktledningen henge ned under bjelkene på bruene. Mer inngående vurderinger i senere planfaser vil avdekke om det er mulig i praksis. Tilgjengelig informasjon om lengder og høyder i denne fasen av arbeidet, tilsier at dette er mest aktuelt å vurdere nærmere for én av de identifiserte fagverksbruene på Nordlandsbanen.

Tabell 46 Oversikt over fagverksbruer som må bygges om i konsept 4, per strekning

	Nordlandsbanen (Stjørdal-Bodø)	Raumabanen	Røros- og Solørbanen	Samlet
Erstatning av fagverksbru i usikkerhetsanalysen	3 stk.	1 stk.	2 stk.	6 stk.
Tilrettelegging av fagverksbru	6 stk.	0 stk.	1 stk.	9 stk.
Totalt antall lukkede fagverksbruer per strekning	9 stk.	1 stk.	3 stk.	13 stk.

## 9.4 Tiltak i kjøretøyflåten

For konsept 4 Elektrifisering er det forutsatt hel-elektriske kjøretøy. Dette er moden og velprøvd teknologi, og det er et velutviklet marked for kjøp av slike kjøretøy. For godslokomotiver er det også mulig å lease elektriske lokomotiver.

Som beskrevet innledningsvis i kapittel 9, har kjøretøyene som benyttes på elektrisk jernbane har en enkel, robust og velprøvd grunnkonstruksjon. De tekniske komponentene i et hel-elektrisk kjøretøy slites mindre enn i f.eks. et dieseldrevet kjøretøy. Dette gir høy pålitelighet, lave vedlikeholdskostnader og høy energieffektivitet.

Det at det ikke lagres energi i kjøretøyet er gunstig i et sikkerhetsmessig perspektiv, ettersom oppbevaring av energi om bord (f.eks. batterier eller hydrogen) kan medføre større konsekvenser ved en ulykke der energioppbevaringssystemet om bord blir skadet.

Det medfører imidlertid større utfordringer dersom det er avvik i strømforsyningen, enn om man har energi om bord. Det kommer i økende grad elektriske kjøretøy på markedet med mindre batterier, som kan brukes til skifting. Disse batteriene lagrer betydelig mindre energi enn batteriene i f.eks. hydrogen- og batterikonseptene, og er kun egnet til forflytning av toget i lav hastighet inne på stasjons-, hensettings- og terminalområder. De omtales dermed også som skiftebatterier. Ved avvik i strømforsyningen for et tog som er underveis i rute, kan de imidlertid også gjøre det enklere og raskere å kjøre toget til et sted som er egnet til å flytte reisende eller gods over på et annet transportmiddel. Det er ikke forutsatt skiftebatterier om bord i de elektriske kjøretøyene i kostnadsestimatet for konsept 4, men det er ingen praktiske hindre for å anskaffe eller bruke slike kjøretøy på elektrifiserte baner.

Det er forutsatt samme antall kjøretøy som for referansealternativet og batterikonseptet, og samme type kjøretøy i alle konsepter (men med ulike energibærere), se kapittel 3.2.2.

Tabell 47 Kjøretøy som forutsettes i konsept 4 Elektrifisering

Kjøretøytype	Nordlandsbanen	Raumabanen	Røros- og Solørbanen	Samlet
Regiontog elektrisk	18	3	8	29
Fjerntog elektrisk	4	0	0	4
Godstog elektrisk	12	2	14	28

## 9.5 Teknologisk modenhet og forventet utviklingsløp

Kontaktledningsanlegg brukes allerede på om lag 3/5 av det statlige jernbanenettet, og teknologien er derfor moden og kan planlegges og bygges så snart det besluttes og bevilges investeringsmidler.

Det forventes ingen store sprang i teknologisk utvikling for kontaktledningsanlegg og omformerstasjoner, som følge av at dette er svært moden teknologi som har vært i bruk i over 100 år. Det pågår kontinuerlig



utvikling og forbedring av teknologien, men denne er svært inkrementell. Ved realisering innenfor en tidshorison på 10-15 år forventes det nye anlegget ha samme egenskaper og ytelse som anlegg som er under bygging i dag, slik som anleggene som bygges for å elektrifisere Trønder- og Meråkerbanen.

Innenfor konseptet ble det også vurdert ulike løsninger for å redusere behovet for å bygge om lave/trange tunnellop på de ikke-elektrifiserte banene. Dobbel kontaktråd ble bl.a. vurdert. Dette er en teknologi som er utprøvd på jernbanen i Norge (indre del av Østfoldbanen), men ikke i stor skala.

Konseptvalgutredningen har også undersøkt om det er gjennomført eller pågår forskning og utvikling av løsninger som gjør det mulig å redusere omfanget av tunneler som må utvides i forbindelse med elektrifisering. Det er ikke gjort funn som tilsier at det kan forventes betydelig utvikling på dette feltet. Det er gjennomført mye forskning og utvikling av lavbyggende kontaktledningsanlegg i Storbritannia i de senere år, i forbindelse med elektrifisering av den britiske jernbanen. Målet har vært å redusere behovet for å utvide tunneler som er for lave/trange. Den britiske jernbanen er imidlertid ulik den norske på flere måter, og er ikke omfattet av felles-Europeiske krav, noe den norske jernbanen er. Gitt omfanget av lave tunneler og de store kostnadene det medfører, bør et framtidig prosjekt for elektrifisering allikevel undersøke om det er gjort erfaringer i EU (primært) og resten av verden som er aktuelle å overføre til en norsk kontekst.

Teknologien for kjøretøy er å anse som moden og godt utprøvd. Det forventes heller ikke noen store sprang i teknologisk utvikling for elektriske kjøretøy, men en videre inkrementell utvikling av kjøretøyene. Blant relevante trender er økt fokus på å gjøre kjøretøyene lettere for å redusere energiforbruket, spesielt i persontransportsegmentet, for å redusere energiforbruket. Det er en trend at elektriske kjøretøy i større grad har et lite skiftebatteri om bord, men det er ikke forutsatt slike i utformingen av konseptet.

## 9.6 Samfunnssikkerhet og tilfredsstillelse av lover og forskrifter

Elektrifisering av jernbanen er en velprøvd teknologi som benyttes på øvrige deler av jernbanenettet i Norge. Det er i tråd med gjeldende krav til samfunnssikkerhet, og tilfredsstiller relevante lover og forskrifter.

Med hensyn til robusthet, redundans og restitusjon (se nærmere forklaring av metode og hensikt i kapittel 6.6.9), er vurderingene for konsept 4 Elektrifisering som følger:

### *Vurdering av robusthet*

Elektrifisering kan medføre noe reduksjon i transportsektorens evne til å tåle ekstraordinære belastninger. I forbindelse med bortfall av strømtilførsel til toget (ved at kontaktledningen rives ned, evt. som følge av ekstremvær e.l.) så vil et helelektrisk kjøretøy ikke ha energilager om bord for å forflytte seg ut av området, i motsetning til diesel og de andre energibærerne som vurderes i KVVU-en. Det forventes at dette kan medføre ulempe for reisende ved driftsbrudd, men ikke noen endring storulykkepotensiale eller -konsekvens. Det forventes å bli vanligere med et lite traksjonsbatteri også på elektriske jernbanekjøretøy, men dette er ikke forutsatt i konseptet.

### *Vurdering av redundans*

Ved elektrifisering vil redundansen i jernbanen som system øke, fordi det i større grad vil være mulig å bruke dagens ikke-elektrifiserte baner til å omdirigere transport fra elektrifiserte baner ved behov. Det gjelder spesielt for Røros- og Solørbanen, som gjør det mulig å kjøre andre ruter mellom Lillestrøm og Støren, uten å måtte bytte til diesellokomotiv. Dette omtales også nærmere i kapittel 9.7.3.

### *Vurdering av restitusjon*

Elektrifisering kan medføre at det tar noe lengre tid å gjenopprette jernbanens transportevne etter en ulykke (f.eks. ras). Dette skyldes at etableringen av kontaktledningsanlegg langs banen øker systemets kompleksitet, og mengden infrastruktur som må reetableres.

## 9.7 Konsekvenser for togtrafikken

Elektrisk drift av togtrafikken gir en rekke muligheter for forbedringer i togtilbudet, sammenlignet med referansealternativet. Disse beskrives nærmere i det følgende.

### 9.7.1 Kortere framføringstid og/eller bedre punktlighet

Elektriske kjøretøy trekker sin energi fra kontaktledningsanlegget og har dermed bedre akselerasjonsevne og mulighet til å bruke mer energi ved særskilt høy belastning (f.eks. godstog i oppoverbakke). Dette gir togene anledning til å utnytte de mulighetene som banens hastighetsprofil gir, og gir dermed redusert framføringstid og/eller bedre punktlighet for svært mange av linjene, sammenlignet med dieseldrift. De fire ikke-elektrifiserte banene er enkeltsporede, og hvorvidt de forbedrede egenskapene ved elektrifisering gir redusert framføringstid for reisende og godskundene, avhenger av rutemodellen som ligger til grunn. På disse banene kjører togene på lengre enkeltsporede strekninger og møtes ved stasjoner og kryssingsspor der to eller flere spor gjør det mulig for togene å krysse hverandre. Dersom reduksjonen i framføringstid ikke er tilstrekkelig til å flytte kryssinger fra ett sted til et annet, vil elektrifisering gi bedre punktlighet, men ikke redusert framføringstid.

Følgende reduksjoner i framføringstid er lagt til grunn i de ulike konseptene. Disse framføringstiden er beregnet som del av energisimuleringene, og tar høyde for stopp for passasjerutveksling, men ikke øvrige stopp for kryssinger, som naturlig nok vil ligge inne i en faktisk ruteplan.

I den samfunnsøkonomiske analysen er det kun for godstogene Trondheim-Bodø (begge veier) og Åndalsnes-Dombås (kun oppover til Dombås) hvor det er beregnet en kjøretidsgevinst, gitt forutsetningene i simuleringene, analysens detaljeringsnivå og den beregnede kjøretidsgevinstens størrelse. Det antas at øvrige kjøretidsgevinster primært vil resultere i bedre punktlighet for de aktuelle linjene, men det kan ikke utelukkes at framtidige rutemodeller for de aktuelle banene kan redusere kjøretidene noe som følge av hel- eller del-elektrifisering. Punktlighetsgevinstene er ikke verdsatt i den samfunnsøkonomiske analysen.

**GK25 Trondheim-Bodø.** Under forutsetning av at hele rutemodellen legges på nytt, er hele kjøretidsgevinsten medregnet i den samfunnsøkonomiske analysen. Fordi banen er enkeltsporet og den totale framføringstiden også er avhengig av kryssinger, er det ikke mulig å vite nøyaktig hvor lang framføringstiden blir i fremtidige ruteplaner, men det antas at det i noen tilfeller vil være lenger venting på kryssing og i andre tilfeller kortere venting enn i dag. Fordi ruteplanen må konstrueres på nytt uansett for å hente ut kjøretidsgevinstene, kan det på dette tidspunktet ikke sies hvilken vei det vil gå. Derfor har prosjektet forutsatt at reisetidsgevinsten er i samme størrelsesorden som resultatene fra kjøretidsberegningene.

**GK23 Åndalsnes-Dombås.** Endring i framføringstid forventes å få direkte konsekvens for rutetidene, som følge av at godstogene ikke har kryssinger på banen. Det er kun avganger fra Åndalsnes til Dombås som får nevneverdig kjøretidsgevinst grunnet stigningen mellom de to endestasjonene.

### 9.7.2 Økt kapasitet, evt. retningsdrift for godstog Hamar-Støren

Elektrifisering av Rørosbanen vil gjøre det rimeligere, og dermed mer attraktivt, å kjøre kombigodstog mellom Oslo og Trondheim over Rørosbanen. I dag kjører disse kun over Dovrebanen. Dersom kombitog også kan kjøre Rørosbanen mellom Oslo og Trondheim, ville det i praksis gitt økt kapasitet for godstogene mellom Hamar og Støren. Ferdigstillelse av dobbeltspor på Dovrebanen fram til Åkersvika er del av referansen i NTP 2025-2036. Videre dobbeltspor helt til Hamar er del av IC-utbyggingen på Dovrebanen, men det er ikke avklart når dette vil bygges. Når det blir bygget dobbeltspor fram til Hamar, vil det med hel-elektrifisering i praksis være to spor fra Eidsvoll helt fram til Støren. På Hovedbanen mellom Lillestrøm og Eidsvoll vil godstogene fremdeles benytte enkeltsporet bane, og det samme gjelder Støren-Trondheim.

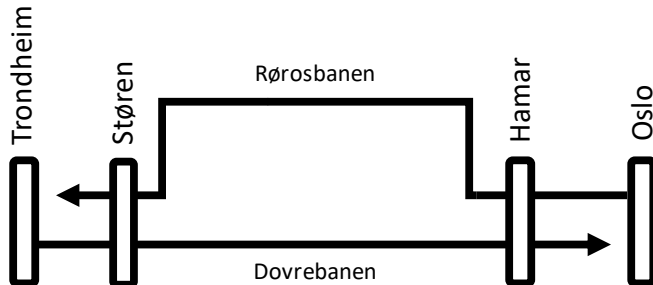
Ved å legge føringer om at godstog til Trondheim kjører over Rørosbanen og godstogene til Oslo kjører over Dovrebanen kan kapasiteten på strekningen økes ytterligere<sup>32</sup>. Løsningen frigir ruteleier på strekningen Hamar-Støren og reduserer antallet kryssinger det vil være behov for. På Rørosbanen går det heller ikke nattog i dag eller i referansetogtilbudet, og det frigir også mer kapasitet og gir færre kryssinger for godstog på nattestid, særlig hvis de kan puljekjøres (med flere tog i samme retning etter hverandre). En slik

---

<sup>32</sup> Hvorvidt nordgående eller sørgående tog benytter Rørosbanen må i så fall avklares nærmere. Dovrebanen har noen meget bratte partier, og vertikal kurvatur gjør at den egner seg best for tunge tog å kjøre sørover. Samtidig er tilsvingen mellom Dovrebanen og Rørosbanen utformet slik at togene først må kjøre inn på Hamar stasjon, og så snu kjøreretning for å komme inn på Rørosbanen. Denne bindingen kan legge bindinger om at det er enklere å realisere den ene veien enn den andre. Det kan også tid på døgnet de ulike banene er mest belastet av annen trafikk, og når godstogene i hver retning har sin rushperiode.

tilgjengeliggjort kapasitet vil gi rom for vekstambisjoner innenfor de ulike togkategoriene som kombitog, tømmerog, fjernog og regionog i distriktene, som ellers må konkurrere om ruteleiene.

Persontogene på banene, samt godstog som skal til/fra endestasjoner mellom Oslo og Trondheim (tømmerog på både Dovrebanen og Rørosbanen, kombigodstogene Oslo-Åndalsnes) vil imidlertid fortsatt gå som før, og behovet for kryssinger vil ikke falle helt bort.



Figur 37 Prinsippskisse som viser mulig utforming av retningsdrift Hamar-Støren

Tømmerog kjører over store deler av det sentrale jernbanenettet, og det er mye trafikk med tømmerog fra Rørosbanen og Dovrebanen over Solørbanen og til Sverige via Kongsvinger. Når tømmerog kjører mellom elektrifiserte og ikke-elektrifiserte baner, må de enten skifte lokomotiv eller kjøre på både den elektrifiserte og den ikke-elektrifiserte banen med et diesellokomotiv. Det samme vil gjelde for andre energibærere enn diesel. For godsoperatørene blir dette uansett en ulempe, ettersom ikke-elektriske lokomotiv er dyrere i drift enn elektriske lokomotiv, eller de må bruke mye tid til å skifte lokomotiv. Elektriske lokomotiv med batteri til skifting vil antageligvis gi størst fleksibilitet for tømmertrafikken. Dersom alle baner elektrifiseres vil det gi minst ulemper, lavere kostnader og størst fleksibilitet for tømmerogoperatørene. De kan da slippe å bytte lokomotiv på Kongsvinger.

På grensestasjoner mellom elektrifisert og ikke-elektrifisert bane, som Kongsvinger og Hamar, tar skifting fra elektrisk til diesellokomotiv opp kapasitet på stasjonsspor som blir frigitt dersom de tilstøtende banen elektrifiseres.

### 9.7.3 Nettverksstruktur gir økt robusthet og fleksibilitet

Det norske jernbanenettet er i stor grad strukturert som en stjerne, der Oslo er navet. Det finnes noen omkjøringsveier i deler av nettet, men for mange av banene finnes det ikke aktuelle omkjøringsveier dersom banen stenges som følge av uforutsette hendelser eller planlagt vedlikehold/fornyelse. For banene i Innlandet og oppover mot Trøndelag så er det delvis et nettverk, ved at Rørosbanen går parallelt med Dovrebanen. I tillegg representerer Kongsvinger-, Solør- og Rørosbanen en alternativ rute mellom Lillestrøm og Støren. Det aller meste av gods- og persontrafikk mellom Østlandet og Trøndelag benytter imidlertid elektrisk bane og elektriske kjøretøy (bl.a. som følge av driftskostnader), og nettverkspotensialet i disse banene kan i liten grad benyttes. Ved stengning av Hovedbanen og/eller Dovrebanen har Bane NOR noen diesellokomotiver som stilles til disposisjon for operatørene, men dette er eldre kjøretøy og ikke en tilstrekkelig løsning for antallet og typen avganger som trafikkerer strekningen i ordinære situasjoner.

Ved å elektrifisere Røros- og Solørbanen blir en større del av den norske jernbanen et nettverk. Dette gir økt redundans (f.eks. ved utvasking av spor), økt fleksibilitet og mulighet for økt kapasitet (som beskrevet i kapittel 9.7.2).

### 9.7.4 Enklere og rimeligere vedlikehold av kjøretøyflåten

Elektriske kjøretøy er enklere og rimeligere å vedlikeholde enn dagens dieselskjøretøy, og vil også være rimeligere å vedlikeholde enn de hybride kjøretøyene som er forutsatt benyttet i konsept 1-3.

Kjøretøy med ulike energibærere må også ha egne anlegg og egen kompetanse for vedlikehold av de energibærerspesifikke komponentene på kjøretøyet. Det må tas stilling til hvilke jernbaneanlegg som skal tilrettelegges med teknisk utstyr og kompetanse for hvilke energibærere.

Kompetanse, reservedeler og vedlikeholdsutstyr for flere energibærere vil også gi økt risiko for manglende evne til å utføre vedlikehold ved behov.

#### **9.7.5 Enhetlig og mer fleksibel kjøretøyflåte**

En viktig fordel med elektrifisering er at den gir kjøretøyeiere og operatører muligheten til å disponere og vedlikeholde en uniform kjøretøyflåte. Dette gjelder både godstogoperatørene, som eier eller leaser sine kjøretøy, og persontogoperatørene, som leier kjøretøy fra Norske tog. Dersom alle kjøretøy benytter samme energikilde, dvs. strøm fra kontaktledning, vil det gi økt fleksibilitet i bruk av kjøretøyflåten. Det kan gi gunstigere bruk av kjøretøy, spesielt de som benyttes til linjer som går på baner med ulik energibærere, og kan potensielt redusere antallet kjøretøy det er behov for. Videre vil dette gi økt fleksibilitet i bruk av kjøretøyflåten på tvers av hele landet (og internasjonalt for enkelte godsaktører), ettersom alle kjøretøyene vil være kompatible med energibæreren på alle baner. Dette gir økt mulighet for å omdisponere kjøretøytyper mellom ulike linjer ettersom behovene endrer seg.

En mer uniform og fleksibel kjøretøyflåte vil også være en økonomisk fordel for godsoperatører som selv investerer i lokomotiver. Ved anskaffelse av lokomotiv med energibærere som bare kan brukes på en bane og kun har fyller/ladestasjoner på noen få punkter på jernbanenettet, vil anskaffelse av lokomotiver være en større risiko for godsoperatørene. I tillegg til ulemper ved begrensede bruksområder og fyller/ladestasjoner, må de også ha egne anlegg og egen kompetanse for vedlikehold og reparasjoner på de delen av kjøretøyet som er energibærerspesifikke. Med små marginer i godssektoren, kan dette gi for store utgifter og for stor risiko til at operatørene finner det verd innsatsen.

#### **9.7.6 Mer robuste fagmiljøer**

Bane NOR, Norske tog og togoperatørene er har allerede sterke fagmiljøer på elektrisk drift og kontaktledningsanlegg. Opprettelse og drift av fagmiljø for flere ulike energibærere vil være heftet både med kostnader til lønninger og administrasjon og en økt sårbarhet knyttet til at det til enhver tid må være ansatt nok fagpersoner med riktig kompetanse i de ulike fagmiljøene. Med færre, større fagmiljøer i de aktuelle organisasjonene, vil det både være lettere å tilby spesialisert opplæring på fagskoler og på arbeidsplassen, samt at det vil være lettere å tiltrekke seg gode fagpersoner.

### **9.8 Mulig tidsplan for innføring av alternativet**

Utbygging av kontaktledningsanlegg, samt andre nødvendige tiltak på infrastrukturen i den forbindelse, er et omfattende prosjekt. Hvor lang tid det tar å gjennomføre en hel-elektrifisering av alle de fire ikke-elektrifiserte banestrekningene avhenger i stor grad av gjennomføringsstrategi, og om man forutsetter parallell gjennomføring på alle banene, eller om man forutsetter at strekningene elektrifiseres i tur og orden. En gjennomgang av de ulike fasene i realiseringen av prosjektet, viser at fra en beslutning er tatt, vil det ta om lag 3-4 år å planlegge og 2-7 år å bygge om banene til elektrisk drift. Dette omtales nærmere i kapitlet som følger.

Det er i hovedsak gjennomført kun tidligfasevurderinger (mulighetsstudier o.l.) for elektrifisering av de fire strekningene. Det er dermed behov for et betydelig arbeid med planlegging, regulering, o.l. før selve byggingen kan igangsettes. Unntaket er elektrifisering av Nordlandsbanen mellom Stjørdal og Steinkjer, som tidligere inngikk i den pågående elektrifiseringen av Trønder- og Meråkerbanen. For denne strekningen finnes det et relativt nytt plangrunnlag som gjør det mulig med raskere igangsettelse på denne strekningen. Se kapittel 9.8.5 for nærmere omtale.

At teknologien er moden og at Bane NOR og potensielle entreprenører allerede sitter på gjennomføringskompetansen, vil gjøre elektrifisering enklere å igangsette, selv om utbyggingen av kontaktledningsanlegg er omfattende.

#### **9.8.1 Beslutningsprosess**

Proessen fram til en beslutning om investering i infrastrukturen og anskaffelse av kjøretøy med ny energibærer foreligger, består av flere ledd. Selve beslutningsprosessen forventes å kreve like mye tid, uavhengig av hvilket konsept som velges. Med hensyn til å realisere effekter på klimagassutslippene fra

norsk jernbane innen 2030, er det en forutsetning at beslutningen tas og følges opp med budsjettmidler for gjennomføring relativt raskt.

Etter at KVV GREEN er ferdigstilt, vil det gjennomføres en ekstern kvalitetssikring (KS1), som vil legge grunnlaget for en beslutning i regjeringen. Dette kan skje samtidig med at regjeringen legger fram sitt forslag til Nasjonal transportplan, og Stortinget behandler denne. Dette forventes medio 2024. Deretter vil det kunne bevilges midler til forprosjektfasen av prosjektet, inkludert utforming av hovedplan og detaljplan. Disse skal i sin tur gjennom en ny ekstern kvalitetssikring (KS2), før en investeringsbeslutning kan tas, anslagsvis tidligst i 2028.

### **9.8.2 Planlegging**

Før det kan bygges må det foreligge teknisk hovedplan, teknisk detaljplan, samt en godkjent reguleringsplan. Teknisk hovedplan utarbeides gjerne parallelt med kommunedelplan, mens en teknisk detaljplan utarbeides parallelt med detaljregulering. Erfaringsmessig kan det ta 5-10 år fra arbeidet med en teknisk hovedplan starter opp til man kan gjennomføre utbygging, men for elektrifisering hjelper det at det meste av berørte arealer allerede er avsatt til jernbaneformål.

Det forventes at minste nødvendige tid til planlegging av elektrifisering vil være om lag 3 år, men den totale tidsbruken avhenger i stor grad av hvor mye av arbeidet som gjøres parallelt vs. sekvensielt. Bruk av internasjonale entreprenører kan bidra til å gjøre det mulig å gjennomføre mer av arbeidet innenfor en begrenset tidsramme, forutsatt tilgang på tilstrekkelig med budsjettmidler.

Hovedplaner for strekningene kan gjennomføres parallelt, så lenge det er kapasitet i prosjektet og leverandørmarkedet. Gjennomføring av hovedplan vil ta 1-2 år, avhengig av hvor mye som er avklart ved hovedplanens oppstart. Banens lengde og prosjektets kompleksitet spiller inn, og Raumabanen kan forventes å være raskere å planlegge enn Nordlandsbanen og Røros- og Solørbanen, som er mye lengre.

Detaljplan kan forventes å ta 1-2 år per parsell, og den totale tidsbruken vil avhenge av hvor stor andel av markedets kapasitet man bruker til planlegging i prosjektet. Erfaringen fra bygging av ny omformerstasjon på Hell tilsier at det tar ca. 2 år totalt å planlegge og prosjektere en omformerstasjon.

Ettersom det meste av arealet som berøres av elektrifiseringen allerede er satt av til jernbaneformål (for kontaktledningsanlegget, tunneler) eller veiformål (for bruer som må bygges om/erstattes), er det primært omformerstasjonene og kobling av disse på det nasjonale strømmettet som vil kreve endringer i arealregulering. Dette kan være tidkrevende, avhengig av hva slags arealer som blir berørt, og tidlig avklaring av plassering av omformerstasjoner og tilkobling til nasjonalt strømmett anbefales.

### **9.8.3 Bygging**

Erfaringene fra elektrifisering av Nordlandsbanen Trondheim-Stjørdal, Stavne-Leangenbanen og Meråkerbanen tilsier at det er mulig å bygge opp mot 100 km kontaktledningsanlegg i året. Dette prosjektet har også jobbet primært som skiftarbeid i perioder på døgnet uten togtrafikk (hvite tider), noe som også er en forutsetning i KVV GREEN, og spesielt viktig på baner med kombigodstrafikk (Nordlandsbanen, Raumabanen) og en klar fordel for reisende og tømmerneringen som benytter Røros- og Solørbanen.

Det forventes å være mulig å bygge hurtigere dersom man settes på flere ressurser, bl.a. i forbindelse med montering av kontaktledningsanlegget (flere boretoget for kontaktledningsmaster). På de nylig elektrifiserte strekningene på Trønder- og Meråkerbanen er det kun tre tunneler, hvorav den lengste (Gevingåsen tunnel) er moderne. På de ikke-elektrifiserte banene, spesielt resterende deler av Nordlandsbanen, er tunnelandelen mye høyere, noe som kan innvirke på tidsbruken i prosjektet.

Erfaringen viser at det tar i overkant av to år å bygge en omformerstasjon, og like lang tid å planlegge/prosjekttere den. Forutsatt tilstrekkelig kapasitet i prosjektet/markedet, kan nye omformerstasjoner planlegges og bygges parallelt med hverandre.

Gjennomføringstempo blir dermed også et spørsmål om økonomisk prioritering, både fordi det innvirker på hvor mye midler som bevilges samtidig til elektrifisering av jernbanen, og fordi samtidig gjennomføring på flere baner/flere steder på samme bane kan forventes å presse prisene i leverandørmarkedet noe opp.

Gitt omfanget av de ulike banene medfører forutsetningen om ca. 100 km per år følgende bruk av tid til elektrifisering, forutsatt at man begynner i én ende og jobber seg framover. Noe tid til opprigging må påregnes i tillegg. Det påpekes at det er stor usikkerhet knyttet til disse anslagene, da økt ressursbruk og parallelt arbeid flere steder på banen kan redusere tiden det tar å bygge. For Nordlandsbanen tilsvarer dette ca. 7 år og for Røros- og Solørbanen tilsvarer det ca. 5 år. Som følge av at det tar to år å bygge en omformerstasjon, anses det som et minste krav til tidsbruk (uavhengig av antallet parallelle entrepriser per bane), og omformerstasjonen er den delen av prosjektet som kan forventes å være dimensjonerende for tiden det vil ta å elektrifisere Raumabanen.

Tiden det tar å bygge avhenger naturlig nok også av stedlige forhold som tilstand på eksisterende infrastruktur, grunnforhold, topografi og trafikkmengde.

#### **9.8.4 Anskaffelse av kjøretøy**

For persontrafikken avhenger anskaffelsestiden primært av om kjøretøyene kan anskaffes gjennom en opsjon i eksisterende avtale med en kjøretøyleverandør, eller om en slik avtale først må inngås. Selve inngåelsen av en slik avtale kan forventes å ta 2-3 år, og selve spesifikasjonen, produksjonen og leveransen av kjøretøyene tar ca. 2-3 år (litt avhengig av antall, naturligvis). I tillegg vil anskaffelse av kjøretøy som benytter umoden og ukjent teknologi ta lengre tid å anskaffe, produsere og testkjøre.

##### *Regiontog*

Nye elektriske regiontog vil ta 2-3 år å anskaffe dersom de kan anskaffes som del av en eksisterende avtale. En mulighet kan være en eventuell framtidig avtale om nye regiontog til Østlandet og andre deler av landet. Dersom det må etableres en egen avtale med kjøretøyprodusent for formålet, vil det ta om lag 5 år å anskaffe nye elektriske regiontog.

De dieseldrevne regiontogene som brukes på de ikke-elektrifiserte strekningene, type 93, oppnår forventet levealder i 2030-32, og må erstattes av nye kjøretøy ved endt levetid. Planlegging av denne anskaffelsen avventer anbefaling og beslutning om framtidig energibærer på de ikke-elektrifiserte strekningene.

De bimodale diesel-kontaktledning regiontogene som brukes på de ikke-elektrifiserte strekningene, type 76, har forventet levetid fram til ca. 2051. Hva som skjer med disse ved overgangen til en ny energibærer må vurderes nærmere. Ved elektrifisering vil de, som bimodale kjøretøy, være egnet til bruk i en overgangsperiode med delvis elektrifisering. Når elektrifiseringen er ferdig, kan de brukes som de er eller bygges om, avhengig av hva en kost-nytte-vurdering viser at er mest hensiktsmessig. Det samme gjelder de fire bimodale fjerntogene som nylig er bestilt og forventes levert og satt i drift i perioden 2024-2027 [17].

##### *Fjerntog*

Norske togs avtale med Stadler om nye fjerntog kan brukes ca. 10 år framover. Avtalen kan benyttes for å anskaffe nye fjerntog med kontaktledning eller kontaktledning/batteri som energibærere. Elektriske fjerntog vil da ta anslagsvis 2-3 år å anskaffe. De vil kunne leveres raskere enn batteri- og hydrogenkjøretøy, som er mindre moden teknologi, spesielt for lange avstander (slik som Trondheim-Bodø).

##### *Godstog*

For godslokomotiver er anskaffelsesprosessen ofte raskere enn for kjøretøy til persontrafikken. Godstogoperatørene avgjør selv hvor omfattende eller enkelt de utformer anskaffelsesprosessen, og det er mindre behov for spesialtilpasning til transportoppgaven enn for persontog (som skal ha setekonfigurasjon, ombordfasiliteter osv.). Det forventes å ta om lag 0,5-1 år inngå avtale om og å få levert nye elektriske lokomotiver. Elektriske lokomotiver er også tilgjengelig for leasing.

Enkelte av godsoperatørene har allerede investert i noen bimodale lokomotiver (diesel-kontaktledning), og ved ferdig elektrifisering kan de velge å fortsette å bruke kjøretøyene eller bygge dem om. Markedet for salg av brukte kjøretøy er bedre for godslokomotiver enn for persontogkjøretøy, og det kan også være mulig for operatørene å selge dem og kjøpe nye eller brukte elektriske kjøretøy som erstatning, dersom de vurderer det som den mest hensiktsmessige løsningen.

### 9.8.5 Mulige pilotprosjekter

For elektrifisering er det ikke aktuelt med piloter, da det ikke er gevinster å hente ved å teste ut teknologien, slik det vil være for de andre konseptene. Imidlertid så utpeker strekningen Stjørdal-Steinkjer seg som et aktuelt første trinn i et framtidig elektrifiseringsprosjekt. Strekningen er tett trafikkert av regiontogene til Steinkjer.

Det har tidligere vært planlagt elektrifisering fra Trondheim til Steinkjer. Grunnet beslutningen om to tog i timen ble omfanget endret til elektrifisering kun til Stjørdal på Nordlandsbanen. For elektrifiseringen av strekningen frem til Steinkjer eksisterer det allerede en hovedplan og en detaljplan, og det pågående elektrifiseringsprosjektet bygger nå en omformerstasjon med nok effekt til å forsyne Nordlandsbanen med strøm helt til Steinkjer.

Følgende tabell presenterer et estimat for forventet tidsbruk i plan- og byggefasen for elektrifisering Stjørdal-Steinkjer. Estimaten er innhentet fra Bane NORs prosjekt for elektrifisering av Trønder- og Meråkerbanen.

Tabell 48 Estimert tidsbruk for ulike aktiviteter i plan- og byggefasen

Aktivitet	Ca. tidsbruk
Revisjon og kvalitetssikring av detaljplan, samt utarbeiding av kontraktstrategi og kontrahering	12-18 mnd.
Prosjektering	12-15 mnd.
Bygging	12-18 mnd.
<b>Totalt</b>	<b>Ca. 4 år</b>

Muligheten for idriftsettelse før 2030 vil dermed avhenge av tid fram til selve beslutningen om å igangsette planlegging og bygging foreligger.

## 9.9 Kostnader

I det følgende beskrives hovedmomentene i hvilke investerings- og vedlikeholdstiltak som forutsettes i dette konseptet. Det henvises til underlagsrapport Grunnkalkyle for nærmere detaljer om satser og kostnadselementer som er benyttet i beregningen av kostnader. Det henvises til rapport om Usikkerhetsanalysen for nærmere beskrivelse av selve usikkerhetsanalysen. Satsene som gjengis i det følgende er justert iht. P50-verdiene fra usikkerhetsanalysen.

Følgende tabeller beskriver kostnadene til investering i infrastrukturen, fordelt på type element og bane.

Tabell 49 Investeringskostnader i infrastrukturen i konsept 4 Elektrifisering (mill. 2023-kroner)

Infrastrukturelement	Nordlandsbanen	Raumabanen	Røros- og Solørbanen
Omformerstasjoner, inkl. tilkobling til nasjonalt strømnett	2 803	467	934
Kontaktledning	8 284	1 340	5 593
Tilrettelegging av tunneler for elektrifisering	8 577	420	287
Tilrettelegging av bruer for elektrifisering	1 630	349	1 806
<b>Sum</b>	<b>21 295</b>	<b>2 577</b>	<b>8 620</b>

Vedlikeholdskostnadene for infrastrukturen er i stor grad en konsekvens av de økte kostnadene ved å vedlikeholde kontaktledningsanlegg og omformerstasjoner. Tiltakene for å utvide tunnelprofiler og heve bruer forutsettes ikke å øke vedlikeholdskostnadene, da dette er tiltak (til dels fornyelse) av infrastruktur som allerede er i bruk. Vedlikeholdet av disse inngår i referansealternativet.

Tabell 50 Vedlikeholdskostnader for infrastrukturen i konsept 4 Elektrifisering (mill. 2023-kroner)

Vedlikeholdskostnader for infrastruktur	Nordlandsbanen	Raumabanen	Røros- og Solørbanen
Sum vedlikeholdskostnader (mill. kr. per år)	73,4	11,7	47,0

Det er forutsatt samme kjøretøyflåte i alle konsepter, med ulike energibærere:

- Regiontog, ca. 110 m lange motorvognsett. Omfatter også regiontog i distrikt, som sannsynligvis vil være kortere enn regiontog til bruk i byområdene.
- Fjerntog, 220 meter lange motorvognsett.
- Godslokomotiv, 6-akslet.

Kjøretøyene vil ha ulike anskaffelseskostnader, avhengig av hvilken energibærer som benyttes. Elektriske kjøretøy er rimeligere både å anskaffe og vedlikeholde en dagens dieselskjøretøy. De er også rimeligere enn kjøretøyene i de andre konseptene, som er dyrere både fordi de er hybride (diesel, hydrogen og batteri kombinasjon med strømvogter for kjøring under kontaktledning). Hydrogen- og batteritogene er i tillegg dyrere fordi disse teknologiene er under utvikling.

Tabell 51 Kjøretøy som forutsettes i konsept 4 Elektrifisering (mill. 2023-kroner)

Kjøretøytype	Mill kr. per kjøretøy	Nordlandsbanen	Raumabanen	Røros- og Solørbanen
Regiontog elektrisk	182	3 279	546	1 457
Fjerntog elektrisk	443	1 773	0	0
Godstog elektrisk	66	798	133	931
<b>Sum per bane</b>		<b>5 849</b>	<b>679</b>	<b>2 388</b>

## 9.10 Oppnåelse av effektmål

### 9.10.1 Reduserte klimagassutslipp innen 2030

Hvorvidt det er mulig å oppnå reduserte klimagassutslipp innen 2030 avhenger i stor grad av hvilke forutsetninger som blir satt for beslutning, planlegging og gjennomføring av konseptet. For konseptet batteri forventes det å ta lang tid å anskaffe kjøretøy, samt planlegging og bygging av nødvendig infrastruktur, og det blir sett på som urealistisk med en full innføring før 2030.

Det er allikevel mulig å gjennomføre noe begrenset utbygging av kontaktledning og enkelte kortere banestrekker vil kunne overføre noe trafikk til en ny energibærer. Det vil derfor kunne være potensiale for å oppnå noe redusert klimagassutslipp i forhold til dagens dieseldrift innen 2030 – gitt en rask beslutningsprosess.

### 9.10.2 Reduserte klimagassutslipp innen 2050

Alternativet reduserer klimagassutslippet ned mot null, sammenlignet med en videreføring av dagens dieseldrift. Alternativet er vurdert å kunne settes i drift i ca. 2035.

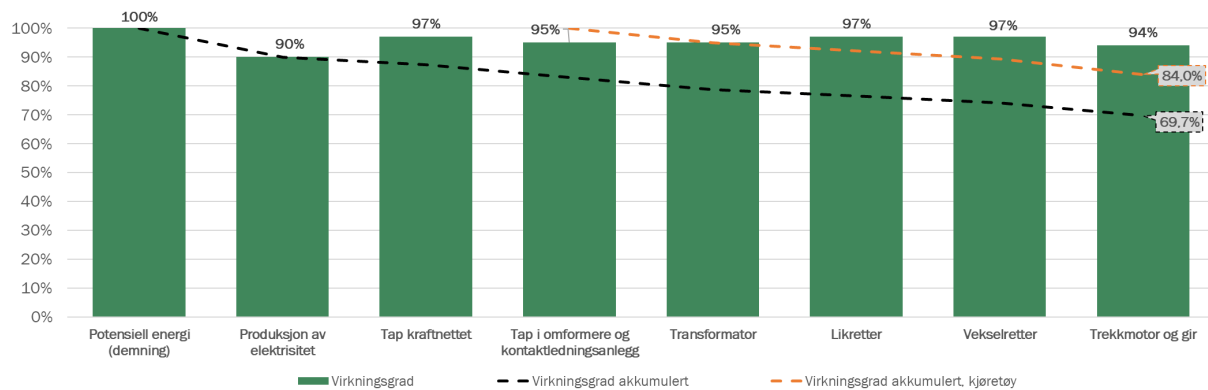


### 9.10.3 Energieffektivitet

#### Energieffektivitet fra «well to wheel»

Energieffektiviteten for Elektrisitet «tank-to-wheel» er beregnet til 84 %. Tank betyr i denne sammenheng berøringspunktet ved strømvtagere/kontaktledning. Energieffektiviteten for elektrifisering i hele kjeden «well-to-wheel» er beregnet til omtrent 70 %.

Energitapet i vannkraftturbiner kan variere avhengig av faktorer som turbinens alder og tilstand. Ifølge en artikkel på TU.no kan man regne med at energitapet i en gjennomsnittlig turbin i Norge ligger på rundt 5-10 % [18]. Tap i linjenettet i Norge var på 5,2 TWh i 2020, som tilsvarer 3,1 % av brutto produksjon [19]. Det legges derfor til grunn at virkningsgraden fra demning frem til omformerstasjon er ca. 90% multiplisert med 97%. Videre kommer det tap i omformerstasjon og jernbanens linjenett frem til togets strømvtagere. I beregningen legges til grunn 98% energieffektivitet for AT-anlegg og 97% for moderne statiske omformere. Til sammen blir dette 95 % energieffektivitet i jernbanens strømmnett, fra og med omformer til togets strømvtagere.



Figur 38 Virkningsgrad – Elektrifisert jernbane (hele kjeden «well-to-wheel»)

#### Forbruk av knappe ressurser

Dette konseptet benytter elektrisitet som energikilde. Det norske forbruket av strøm er på 133 TWh [13]. Energiforbruket i dette alternativet er beregnet til 131 GWh. Hensyntatt tap i transport av strøm gir dette et energibehov på omtrent 142 GWh. Dette strømforbruket utgjør en liten del av det totale strømforbruket i Norge (kun ca. 0,1 % av totalmarkedet). Konseptet anses derfor ikke å benytte en uforholdsmessig stor andel av en knapp energiresurs – som potensielt kan motvirke omstilling i andre sektorer, og vektas dermed likt som referansealternativet.

### 9.10.4 Togtilbudets attraktivitet

#### Togenes akselerasjonsevne som funksjon av kjøretøy og energitilgang

Elektriske kjøretøy har rask tilgang på mye energi gjennom kontaktledningen, sammenlignet med dieselelektriske kjøretøy. Dette gjør det mulig for toget å komme raskere opp i høye hastigheter. Denne egenskapen gjør at toget bedre kan utnytte banens hastighetsprofil, noe som vil medføre redusert framføringstid, bedre punktlighet og/eller bedre kapasitet, sammenlignet med dieseldrift, avhengig av hvordan togtilbudet utformes. Skår er dermed en forbedring relativt til referanse.

#### Togenes trekkraft

Elektriske kjøretøy har anledning til å bruke mer kraft ved behov enn dieselskjøretøy med tilsvarende utforming, noe som bl.a. er nyttig når de skal trekke tung last i bratte/lange oppoverbakker. Denne egenskapen gjør at toget bedre kan utnytte banens hastighetsprofil, noe som vil medføre redusert

framføringstid, bedre punktlighet og/eller bedre kapasitet, punktlighet sammenlignet med dieseldrift, avhengig av hvordan togtilbudet utformes.

Der trekraften begrenser hvor mye gods som kan fraktes (f.eks. for godstog som går i blandet trafikk med persontog og dermed må holde en viss hastighet), kan elektriske tog også gjøre det mulig å frakte mer gods per avgang. Dette antas imidlertid bare å være delvis relevant, slik togtilbudet på de ikke-elektrifiserte strekningene er utformet i dag. For persontogene, kombigodstogene og malmtogene fra Rana Gruber er infrastrukturen dimensjonerende for hvor lange togene kan være og hvor mye de kan frakte. For tømmerogene kan imidlertid økt trekraft også gi mulighet for lengre tog.

#### *Ulemper for togtilbudet som følge av lade- og tankestopp*

Det er ingen ulemper for driften av togtilbudet som følge av behov for lade- og tankestopp i referansealternativet, og det vil heller ikke være det med elektrifisering, ettersom toget kontinuerlig får tilført energi. Skår er dermed lik som i referanse.

#### *Konsekvenser for effektiv tog lengde*

I enkelte konsepter vil det være lengdemeter i toget som går bort til energilager og dermed ikke kan brukes til reisende eller gods. For elektrifisering vil det ikke være store endringer i effektiv tog lengde, sammenlignet med referansealternativet.

For persontog kan den effektive tog lengden forventes å øke noe med elektrifisering, som følge av at det er behov for mindre teknisk utstyr om bord i et hel-elektrisk kjøretøy, enn i kjøretøy som kan kjøre både på diesel og kontaktledning. Blant annet ser vi at den bimodale (diesel-kontaktledning) varianten av FLIRT som benyttes på Trønder- og Meråkerbanen (type 76) er 113 meter langt, sammenlignet med de hel-elektriske variantene av FLIRT som benyttes på Østlandet og Vossebanen (type 74 og 75), som er 110 meter langt. Det er avsatt noen meter mer til oppbevaring av teknisk utstyr om bord i type 76, noe som reduserer den effektive tog lengden som kan brukes til frakt av passasjerer.

Type 76 er en tilpasning av type 75 til bimodal drift, noe som nok innvirker på de tekniske løsningene som er valgt. Når bimodale kjøretøy designes fra bunnen, i stedet for å være en tilpasning av en eksisterende kjøretøytype, så er det rimelig å forvente at designerne i enda større grad klarer å benytte tilgjengelig plass under gulv og over taket til oppbevaring av teknisk utstyr. I slike tilfeller kan det forventes at forskjellen blir mindre enn den mellom type 76 og type 75, potensielt ingen forskjell i det hele tatt.

For godstog er det forutsatt bruk av bimodale lokomotiver (diesel-kontaktledning) i referansealternativet. Som for persontog, vil den bimodale varianten av et gitt godslokomotiv kunne være noe lengre enn en variant med kun én energibærer, som følge av behov for mer teknisk utstyr ombord. Stadlers EuroDual9000 er et eksempel på et bimodalt lokomotiv (diesel-kontaktledning) som brukes i Norge. Disse togene har samme lengde som Euro6000, som er den hel-elektriske varianten av Stadlers Euro-serie. Det er med andre ord ikke gitt at hel-elektriske lokomotiv må være kortere. Forskjellen vil uansett være liten sammenlignet med togets fulle lengde (ca. meter av opptil 600 meter lange tog).

Som følge av dette, skårer elektriske tog litt bedre enn referansealternativet.

*Tabell 52 Eksempler på tog lengder for bimodale og elektriske varianter av kjøretøy i bruk i Norge*

	<b>Motorvognsett til persontrafikk</b>	<b>Godslokomotiv</b>
Bimodale (diesel-kontaktledning) kjøretøy	Stadler FLIRT type 76: 112,7m	Stadler EuroDual: 23,02m
Elektriske kjøretøy	Stadler FLIRT type 74 og 75: 105,5m	Stadler Euro6000: 23,02m*

\*Euro6000 er en ny variant av EuroDual-lokomotivene, og er foreløpig ikke brukt i Norge.

#### *Toget aksellast kan realisere hastigheter iht. overbygningsklasse C*

Rene elektriske kjøretøy vil sannsynligvis være noe lettere enn bimodale kjøretøy, som følge av mindre behov for teknisk utstyr om bord i kjøretøyet. Det er forutsatt bimodale kjøretøy (diesel-kontaktledning) i referansealternativet, som kan være noe tyngre enn rene diesel-kjøretøy (som også benyttes i dagens situasjon). Det er forutsatt at vekten av de bimodale kjøretøyene ikke medfører begrensninger i hastighet

iht. overbygningsklasse C i referansealternativet, og overgangen til elektriske kjøretøy vil dermed skåre likt som referansealternativet.

### 9.10.5 Oppsummering av alternativets effektmåloppnåelse

Tabell 53 Oppsummering av effektmåloppnåelse for konsept 4

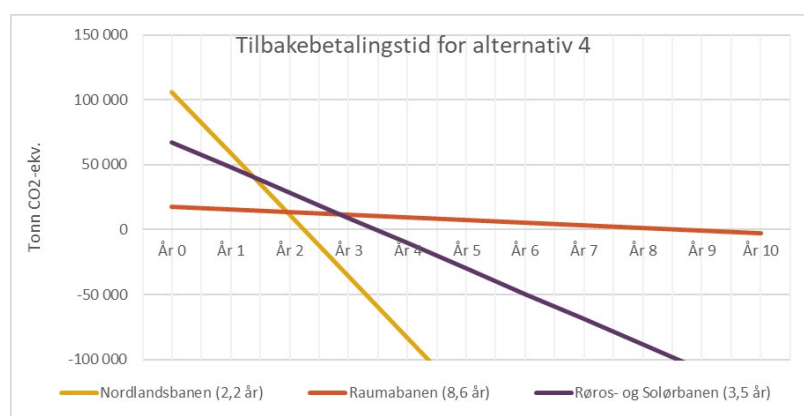
Effektmål	Vurderingsmetode	Måleenhet	Verdi (avrundet)	Relativ skår
1. Utslipp innen 2030	Beregnet CO <sub>2</sub> -utslipp	Tonn CO <sub>2</sub> e årlig gjennomsnitt 2023-2029	<70 000	(+)
2. Utslipp innen 2050	Beregnet CO <sub>2</sub> -utslipp	Tonn CO <sub>2</sub> e årlig gjennomsnitt over levetiden	3 000	+++
3. Energieffektivitet	Energieffektivitet WTW	Prosentvurdering	70 %	+++
	Forbruk av knappe ressurser	Kvalitativ vurdering	0,1 % av brutto strømforbruk i Norge	0
4. Attraktivitet	Akselerasjonsevne	Kvalitativ vurdering		+++
	Trekraft	Kvalitativ vurdering		+++
	Lade-og-tankestopp	Kvalitativ vurdering		0
	Effektiv tog lengde	Kvalitativ vurdering		+
	Aksellast	Kvalitativ vurdering		0

### 9.11 Tilfredsstillelse av rammebetingelser

Dersom enkelte av løsningsalternativene ikke tilfredsstiller rammebetingelsene innenfor en tidsperiode, må det tas stilling til om alternativet skal forkastes, eller om det eventuelt kan fungere i en kombinasjonsløsning eller for deler av jernbanesektoren.

#### 1. Løsningen må ikke bidra til å øke de globale klimagassutslippene

En forenklet beregning av globale klimagassutslipp viser at utslipp av CO<sub>2</sub>-ekvivalenter i forbindelse med investering er innspart i løpet av 2,8 år for konseptet samlet sett. Se figuren under for fordeling per strekning. Rammebetingelsen anses dermed oppfylt med god margin (se klimavedlegg).



Figur 39 Tilbakebetalingstid for konsept 4 for de ulike banestrekningene

## **2. Realiserbarhet i drift**

*Løsningen må ha et driftskonsept som muliggjør effektiv drift under forventede fremtidige myndighetskrav.*

Elektrifisering er en veletablert og godt utprøvd løsning for energiforsyning på jernbanen, og helt realiserbar i drift.

## **3. Driftsstabilitet og regularitet**

*En løsning kan ikke gi lavere nivå av driftsstabilitet eller regularitet enn referansealternativet.*

Elektrifisering av de gjenstående ikke-elektrifiserte banestrekningene vil gi økt pålitelighet for både person- og godstoglinjer som trafikkerer disse banene. Elektrisk drift gir bedre akselerasjon og mulighet for høyere hastighet ved behov for særskilt høy effekt (f.eks. tunge godstog i oppoverbakker). Dette gir tog med elektrisk drift bedre mulighet til å holde en gitt rute, og til å hente inn eventuelle forsinkelser, enn det dieseldrift gjør. Elektrifisering kan dermed forventes å gi bedre punktlighet og minst like god regularitet som i referansealternativet.

## **4. Teknologimodenhet**

*Prosjektet skal kun vurdere tilgjengelige teknologiske løsninger som har høy grad av gjennomførbarhet for bruk på norsk jernbane. (tilgang på kjøretøyteknikk og tilgang på infrastrukturteknikk).*

Elektrifisering av jernbanen er en helt moden teknologi, og svært høy grad av gjennomførbarhet.

## **5. Interoperabilitet**

*Løsningen må være vurdert mot behovet for interoperabilitet med Sverige for person- og godstoglinjer som går i den grenseoverskridende trafikken.*

Med elektrifisering vil interoperabiliteten mellom Nordlandsbanen, Raumabanen, Rørosbanen og Solørbanen bli bedre enn i dag, som følge av at tilstøtende deler av det Norske og Svenske jernbanenettet allerede er elektrifisert.

## **6. Standardisering**

*Løsningen må kunne standardiseres i den forstand at løsningen(e) som velges kan bli brukt av alle relevante kjøretøy, og at det legges opp til at fremtidige kjøretøy også kan bruke løsningen(e) uten at det krever særlige tilpasninger og spesielløsninger for hvert kjøretøy.*

Elektrifisering og elektriske kjøretøy er allerede standardisert og et stort utvalg gods- og persontogkjøretøy er tilgjengelig i det europeiske markedet.

## **7. Samfunnssikkerhet**

*Sårbarheten i forhold til opprettholdelse av jernbanens samfunnsfunksjon må ikke få unødige eller uakseptable økninger. Vesentlig økt risiko for storulykke knyttet til jernbanen må ikke innføres.*

Elektrifisering er en godkjent løsning som benyttes på resterende deler av den norske jernbanen i dag.

## **8. Tilfredsstillende lover, forskrifter og annet førende regelverk**

*Løsningen må tilfredsstillende minimumskrav i gjeldende norsk og europeisk regelverk, og være akseptabel for de aktører som er ansvarlige for sikkerhet og risiko ved driften, herunder driftssikkerhet, arbeidsmiljø og ytre miljø.*

Hel-elektrifisering er en godkjent løsning med et fullstendig regelverk.

## **9. Kompatibilitet med dagens teknologi**

*Løsninger basert på ny teknologi må kunne benyttes samtidig med dagens teknologiske løsning, slik at en smidig overgang til valgt konsept sikres.*

Etablering av kontaktledning er ikke til hinder for bruk av diesel som energibærer fram til anlegget er ferdig.

# 10 Samfunnsøkonomisk analyse

Det vises til separat rapport for samfunnsøkonomisk analyse. Her er tatt inn et sammendrag av denne rapporten.

Det er gjennomført en samfunnsøkonomisk analyse av 4 konsepter i alternativanalysen. For Røros- og Solørbanen er disse banene så sterkt knyttet sammen for godstrafikken at vi velger å se disse banene sammen i den samfunnsøkonomiske analysen. Referansealternativet og de 4 konseptene på Nordlandsbanen, Raumabanen og Røros- og Solørbanen er:

- K0 – Referanse (Diesel)
- K2a – Hydrogen
- K2b – Hydrogen med deelektrifisering
- K3 – Batteri
- K4 – Elektrifisering

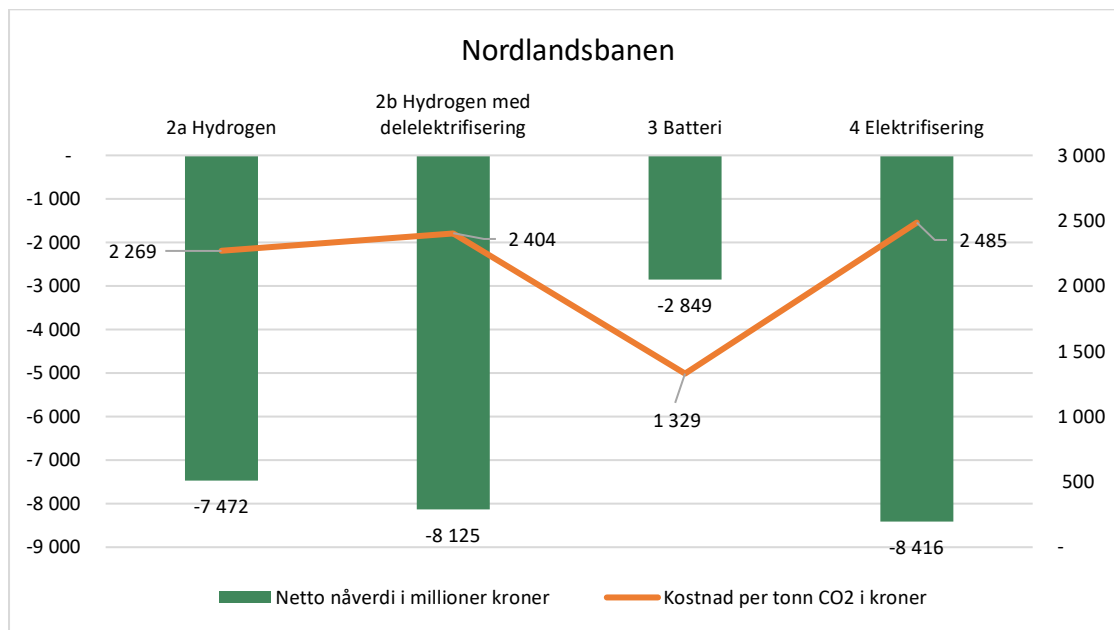
Hvert alternativ/konsept skal ifølge vanlig praksis for samfunnsøkonomiske analyser sammenlignes med et referansealternativ som her er dagens dieseldrift. CO<sub>2</sub> utslipp og lokale utslipp er prissatt. Det betyr at om et konsept kommer ut i negativ nåverdi er dagens dieseldrift mer lønnsom samfunnsøkonomisk enn ny energibærer. Motsatt er det om nåverdien er positiv, da er ny energibærer samfunnsøkonomisk lønnsom. Dette forutsetter at inndataene til den samfunnsøkonomiske analysen er realistiske.

Det er gjort et omfattende arbeid i KVV-en med innsamling av data og energisimuleringer. Ved hjelp av dette er det beregnet de parametere som endrer seg ved å gå bort fra dieseldriften. De viktigste parametere er:

- Investeringskostnader på infrastrukturen
- Kjøretøy
- Energi- og vedlikeholdskostnader på kjøretøyene
- Kjøretidsreduksjoner godstog
- Prissatte lokale og globale utslipp

Det som kjennetegner konseptene med batteritog og elektriske tog er at de er mye mer energieffektive og koster mindre å fremføre togene for operatørene enn dieseldriften. Hydrogenkonseptene, spesielt 2a, gir ikke slike store reduksjoner i driftskostnadene for operatørene. Men i en samfunnsøkonomisk analyse har investeringskostnadene ofte vel så stor betydning, og her er det langt mindre investeringer ved hydrogenkonseptene. Dette tilsier at hvis det er relativt mye togtrafikk, så vil det favorisere alternativene elektriske tog og batteritog, mens hvis det er relativt lite togtrafikk, så vil det favorisere alternativene med hydrogen.

## 10.1 Nordlandsbanen



Figur 40: Netto nåverdier og kostnader pr tonn redusert CO<sub>2</sub> på Nordlandsbanen

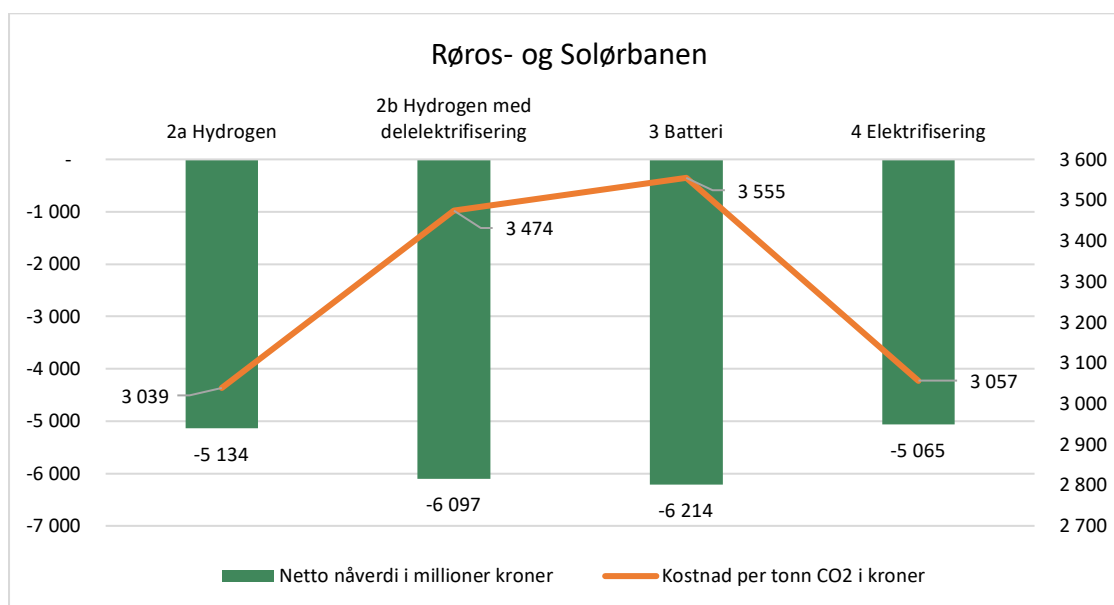
Figur 40 viser samfunnsøkonomisk netto nåverdi fra byggefase og 75 år fra åpningsåret. Når netto nåverdi er negativ betyr det at det er en netto samfunnsøkonomisk kostnad i forhold til dagens dieseldrift (referansealternativet) ved å redusere CO<sub>2</sub>-utslippene med de tiltakene som er valgt, selv om CO<sub>2</sub>-utslippene er prissatt. Netto nåverdi er summen av alle fremtidige fordeler og ulemper ved tiltaket for samfunnet som en nåverdi. Når netto nåverdien er negativ for alle tiltak betyr det pr definisjon at de er samfunnsøkonomisk ulønnsomme og at diesel kommer best ut som konsept etter de prissatte virkninger. Beregningen viser at batterikonseptet kommer best ut av alternativene til fossil diesel på Nordlandsbanen med en netto nåverdi på - 2 849 millioner kroner. Kostnad pr tonn CO<sub>2</sub> er beregnet til 1 329 kr for batterikonseptet. Det er i tiltakskategori 2 ifølge Miljødirektoratets kategorisering mellom 500-1 500 kr pr tonn CO<sub>2</sub> redusert.

Det er forholdsvis store investeringer i infrastruktur som kontaktledninger, omformerstasjoner med mer på omtrent 6,4 milliarder kroner for batteri, men effekten via billigere og mer effektiv drift gjør at batterikonseptet kommer best ut på Nordlandsbanen, der det kjøres relativt mye tog sammenlignet med andre jernbanestrekninger det kjøres dieseltog. Infrastrukturen har en levetid på 75 år for kontaktledningsanlegg og det er derfor regnet slike positive virkninger så langt frem i tid fra antatt åpningsår for drift i 2033.

Til sammenligning har hydrogen 2a investeringer i infrastruktur som blant annet hydrogen fyllestasjoner og jernbanespor tilknyttet disse samt verksteder og beredskapstiltak på 2,8 milliarder kroner, altså godt under halvparten av batterikonseptet. Men hydrogen 2a kommer dårligere ut på grunn av høye driftskostnader for togene. Både batteri og hydrogen har dyrere jernbanekjøretøy enn diesel, men det er kostnaden ved å fremføre togene som blir avgjørende. Det er også regnet godsnytte av at togene kjører fortere på Nordlandsbanen med ca. 25 minutter mellom Bodø og Trondheim for batterikonseptet og hydrogen 2b samt 50 minutter for elektriske lokomotiv. Elektrisk er mest effektive driftsform. Men høye investeringer på infrastrukturen på 21,3 milliarder kroner, gjør at hydrogenkonseptene og batteri kommer bedre ut enn elektrisk.

Hydrogenkonseptet med deelektrifisering er ikke så effektivt, og det er dyrere å fremføre togene enn for batterikonseptet. Det krever mer investeringer enn 2a på grunn av deelektrifiseringen. Det er investeringer på jernbaneinfrastrukturen på 4,6 milliarder kroner for konsept 2b på Nordlandsbanen. Hydrogen med deelektrifisering gir i nærheten av samme energi- og vedlikeholdskostnader for godstog som dagens dieseldrift og en forbedring for persontogene på Nordlandsbanen. For batteri er det store reduksjoner i driftskostnadene for godsoperatørene som en antar slår ut i nytte for godskundene gjennom at de betaler mindre for transporten. Det er også store reduksjoner for persontransportoperatørene.

## 10.2 Røros- og Solørbanen

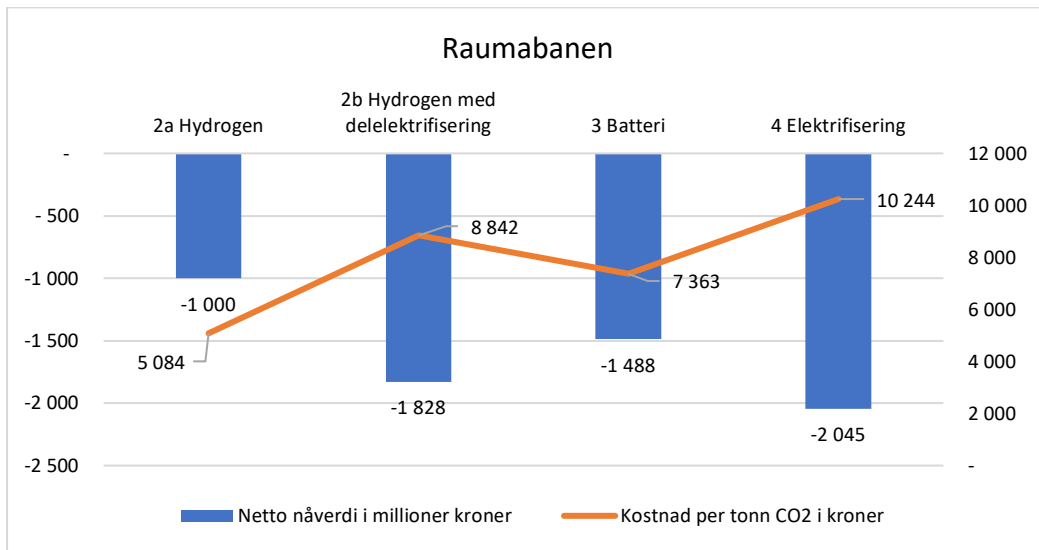


Figur 41 Netto nåverdi og kostnader pr tonn redusert CO2 for konseptene på Røros- og Solørbanen

På Røros- og Solørbanen kommer elektrifisering marginalt bedre ut enn neste beste konsept, Hydrogen 2a, selv om elektrifisering har en investeringskostnad på 8,6 milliard kroner. Det skyldes at hydrogenkonseptene har så mye større negative konsekvenser for driften gjennom dyrere kjøretøy og at det er dyrere å kjøre hydrogentog enn elektriske tog. Dessuten har hydrogenkonseptene betydelige investeringer på infrastrukturen, særlig konsept 2b med 2,4 milliarder kroner. Batterikonseptet kommer dårligst ut på grunn av relativt høye investeringer på infrastrukturen på 5,4 milliarder kroner og kostbart kjøretøy samt batterikostnader.

Det presiseres at ingen av konseptene er samfunnsøkonomisk lønnsomme på Røros- og Solørbanen, da netto nåverdien er klart negativ, det vil si at referansealternativet diesel kommer best ut. Kostnad pr tonn CO<sub>2</sub> er på 2 039 kr pr tonn for beste konsept hydrogen 2a. Det er i mest kostbar tiltakskategori som Miljødirektoratet opererer med over 1500 kr pr tonn. Hydrogen 2a og elektrifisering kommer nokså likt ut og endringen i rangering skyldes at CO<sub>2</sub> kostnader er ekskludert fra netto nåverdi i kostnad pr tonn CO<sub>2</sub>. Elektrifisering er å foretrekke av hensyn til tilsvarende driftsform på tilstøtende banestrekninger som Kongsvinger- og Dovrebanen.

### 10.3 Raumabanen



Figur 42: Netto nåverdier og kostnader pr tonn redusert CO2 for konseptene på Raumabanen

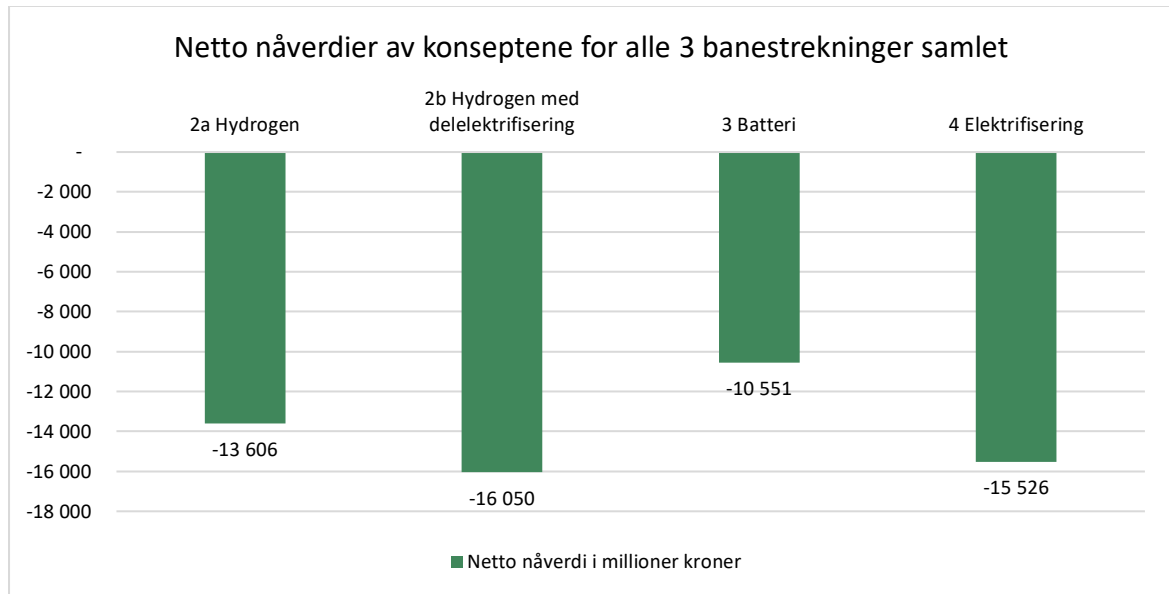
Heller ikke for Raumabanen kommer noen konsept ut i positiv samfunnsøkonomisk netto nåverdi. Hydrogenkonseptet kommer best ut med en netto nåverdi på fremtidige nytte- og kostnadsvirkninger i 75 år på - 1 milliard kroner og en kostnad pr tonn CO<sub>2</sub> på 4 737 kr. Målt i kostnad pr tonn CO<sub>2</sub> redusert blir tiltakene desidert mest kostbar på Raumabanen, noe som har sammenheng med lite togtrafikk på strekningen.

Raumabanen er korteste banestrekning og i forhold til Røros- og Solørbanen er det betydelig mindre investeringer. Hydrogen 2a kommer best ut på grunn av relativt lite investeringer på den lite trafikkerte Raumabanen med en netto nåverdi på 1 000 millioner kroner. Kostnad pr tonn redusert CO<sub>2</sub> blir høy for hydrogenkonseptet med 5 084 kroner, noe som har sammenheng med lite togtrafikk og dermed lite redusert CO<sub>2</sub> utslipp fra dagens dieseldrift.



## 10.4 Banestrekningene samlet

Figuren nedenfor viser samlet netto nåverdier for hver ny energiform for de tre aktuelle jernbanene samlet.



Figur 43: Netto nåverdier for alle 3 banestrekninger samlet

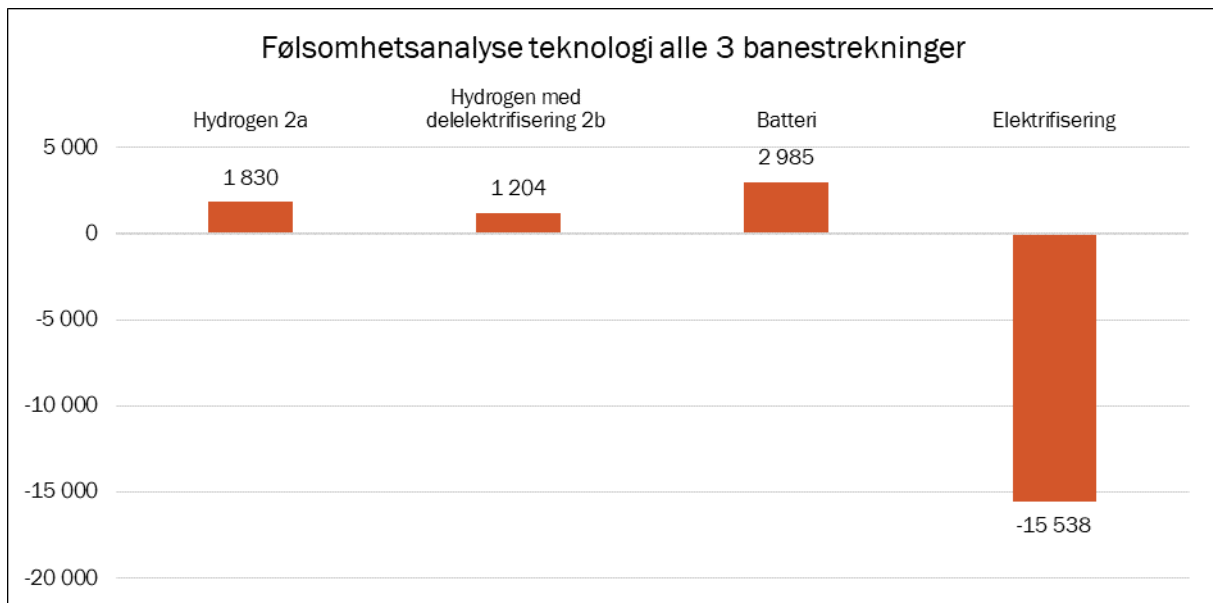
Samlet sett kommer batteri best ut med minst negativ nåverdi på -10,5 milliarder kroner. Årsaken til dette er at Nordlandsbanen teller mest i summen av netto nåverdi. Nest best kommer hydrogen 2a med ca. -13,6 milliarder kroner. Siden nåverdien av alle alternativ er negativ kommer referansealternativet diesel best ut når en prissetter CO<sub>2</sub>-utslipp etter hovedalternativet for karbonprisbane.

Netto nåverdi for batteri er drøyt 3 milliarder kroner bedre enn hydrogen 2a, som kommer nest best ut. Hydrogenkonseptene kommer dårligere ut enn batteri som en følge av høye driftskostnader og kostbare kjøretøy, selv om investeringene på infrastrukturen er lavere enn for batteri.

## 10.5 Følsomhetsanalyser

Det er også gjort følsomhetsanalyser med en mer optimistisk teknologiutvikling og endrede energipriser som endrer på rangeringen av konsepter i favør av hydrogen ved lave energipriser. Så resultatene ovenfor er beheftet med usikkerhet.

Spesielt er det sett på følsomhetsanalyser der umodne teknologier som hydrogen og batteri får en mer optimistisk teknologiutvikling. Figuren nedenfor viser resultatet med en optimistisk teknologiutvikling for alle baner. Det er lagt til grunn rimeligere kjøretøy og rimeligere batterier i konsept 2 og 3, mer effektiv energiutvinning/forbruk og rimeligere fyllestasjoner i konsept 2 og behov for en lavere andel deelektrifisering i konsept 3. Det er ikke forutsatt tilsvarende endringer for referansealternativet diesel og elektrisk drift, som begge er modne teknologier.

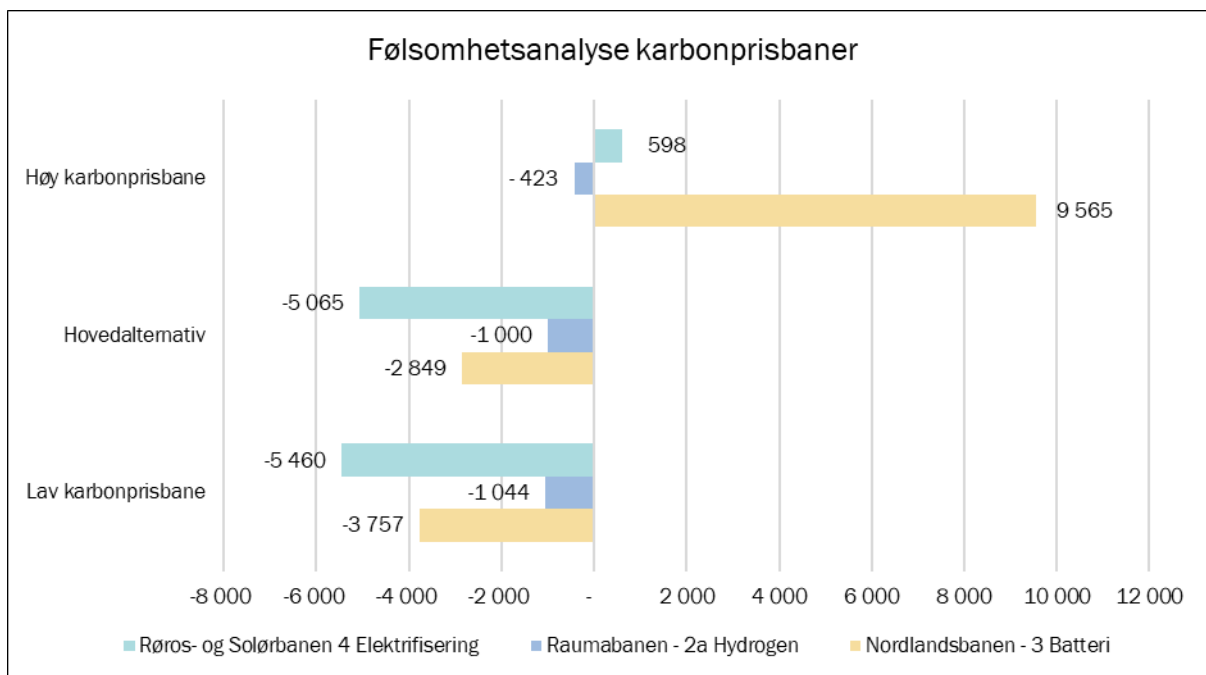


Figur 44: Følsomhetsanalyse teknologi for alle tre banestrekninger. Netto nåverdier i millioner kroner med optimistisk teknologisk utvikling

Med et slikt scenario blir både batteri- og hydrogenkonseptene klart samfunnsøkonomisk lønnsomme. Det er imidlertid hydrogenkonseptene som får mest fordeler av en slik optimistisk teknologisk utvikling som reduserer driftskostnadene, da det er her potensialet for effektivisering av driften er størst. Figuren viser at hydrogen 2a kommer adskillig nærmere batteri i netto nåverdi enn i basisalternativet ovenfor. Men batteri får likevel med et slikt scenario 1 milliard kroner bedre nåverdi enn hydrogen 2a.

Batteri kommer best for alle tre banestrekningene samlet sett i hovedberegningen, og i følsomhetsanalysene med økt trafikkvekst, høye energipriser og optimistisk teknologiutvikling. Hydrogen 2a kommer best ut kun i følsomheten med lave energipriser. Det synes rimelig da å konkludere med at batterikonseptet er beste konsept om det blir aktuelt å innføre samme energiform på alle tre banestrekningene.

I denne nyttekostnadsanalysen har karbonprisbaner stor betydning. Karbonprisen/CO<sub>2</sub>-prisen avgjør nyttegevinsten av reduserte CO<sub>2</sub>-utslipp. Det er lagt opp til følsomhetsanalyser med lav og høy karbonprisbane i retningslinjene for samfunnsøkonomiske analyser til Finansdepartementet. Det er sett på hvilke utslag dette gir for de beste konseptene målet etter nåverdi på hver banestrekning. Resultatet ble som vist i tabellen nedenfor.



Figur 45: Følsomhetsanalyse karbonprisbaner. Netto nåverdi i millioner kroner

Prisene er usikre. Den høye prisbanen tar utgangspunkt i det FNs klimapanel (IPCC) mener er nødvendig for å begrense global oppvarming til 1,5 grader. Med en slik prissetting blir batterikonseptet på Nordlandsbanen svært lønnsomt med en netto nåverdi på 11,2 milliarder kroner. Elektrifisering av Røros- og Solørbanen kommer også ut i samfunnsøkonomisk lønnsomhet. Dette illustrerer hva usikkerheten om anslag i karbonpris gir som utslag her. En ny artikkel i tidsskriftet Samfunnsøkonomen nr 3 2023 konkluderer med at hovedalternativet for karbonprisbane ligger for lavt, og forfatterne anbefaler en karbonprisbane som ligger i nærheten av banen FNs klimapanel anbefaler [20]. Det er derfor ansett som usikkert at batterikonseptet på Nordlandsbanen og elektrifisering av Røros- og Solørbanen er samfunnsøkonomisk ulønnsomt.

Det er gjennomført en analyse av ikke prissatte virkninger. De ikke-prissatte virkningene vil være av mindre omfang sammenlignet med bygging av ny jernbane. Tabellene nedenfor sammenstiller rangeringen av konsept for den enkelte banestrekning etter både prissatte og ikke prissatte virkninger i basisalternativet. Konklusjonen er at de ikke prissatte virkninger ikke vil endre rangeringen etter prissatte virkninger for beste konsept på de 3 jernbanene, men det blir noen endringer i rekkefølgen under beste konsept.

## 10.6 Ranging Nordlandsbanen

Det er sammenfallende vurdering av batteri som beste konsept iht. både prissatte og ikke-prissatte virkninger. Hydrogen 2a har ca. 1 mrd. kr høyere netto nåverdi enn 4 elektrifisering og det vurderes at 2a samlet sett kommer bedre ut. For 2b og 4 er forspranget på 369 millioner kroner for 2b så vidt lite at vi rangerer 4 foran.

Tabell 54 Ranging av alternativer etter både prissatte og ikke-prissatte virkninger på Nordlandsbanen

Rangering	Samfunnsøkonomisk analyse			Ikke prissatte virkninger (IPV)	Samlet vurdering
	Rangering	Netto nårverdi (mill. nok)	Kostnad per tonn redusert CO <sub>2</sub> -utslipp i kroner		
1	3 Batteri	-2 849	1 329	3 Batteri	3 Batteri
2	2a Hydrogen	- 7 472	2 269	4 Elektrifisering	2a Hydrogen
3	2b Hydrogen med del-elektrifisering	-8 125	2 404	2a Hydrogen	4 Elektrifisering
4	4 Elektrifisering	-8 416	2 485	2b Hydrogen med del-elektrifisering	2b Hydrogen med del-elektrifisering

## 10.7 Ranging Røros- og Solørbanen

4 er marginalt bedre enn 2a vurdert etter de prissatte virkningene. Det samme er 2b sammenlignet med 3. Men 2a og 2b skårer dårligst på IPV, spesielt for naturmangfold. Fyllestasjonen på Støren er lagt til et svært viktig naturområde hvor flere utredninger konkluderer med at området bør spares for alle typer inngrep. Dette tilsier at 4 bør rangeres foran 2a, og 3 foran 2b.

Forskjellen mellom prissatte virkninger for konsept 3 og 4 er for stor til at IPV endrer rangeringen. Det samme gjelder for 3 og 2a. Usikkerheten knyttet til plassering av fyllestasjon for hydrogen og ulikheten i netto nytte gjør at 2a rangeres foran 3. Forskjellen mellom 3 og 2b er mindre, og de negative virkningene på naturmangfold gjør at 2b kommer dårligst ut i rangeringen etter IPV. Det understrekes at virkningen 2a og 2b har på naturmangfold, slik konseptene foreligger, gir arealbeslag av særlige viktige naturtyper av både lokal og nasjonal interesse.

Tabell 55 Ranging av alternativer etter både prissatte og ikke-prissatte virkninger på Røros- og Solørbanen

Rangering	Samfunnsøkonomisk analyse			Ikke prissatte virkninger (IPV)	Samlet vurdering
	Rangering	Netto nårverdi (mill. nok)	Kostnad per tonn redusert CO <sub>2</sub> -utslipp		
1	4 Elektrifisering	-5 065	3 057	3 Batteri	4 Elektrifisering
2	2a Hydrogen	-5 134	3 039	4 Elektrifisering	2a Hydrogen
3	2b Hydrogen med del-elektrifisering	-6 097	3 474	2a Hydrogen	3 Batteri
4	3 Batteri	-6 214	3 555	2b Hydrogen med del-elektrifisering	2b Hydrogen med del-elektrifisering

## 10.8 Ranging Raumabanen

IPV har samme ranging som de prissatte virkningene og endrer dermed ikke rangingen.

Tabell 56 Ranging av alternativer etter både prissatte og ikke-prissatte virkninger på Raumabanen

Ranging	Samfunnsøkonomisk analyse			Ikke prissatte virkninger (IPV)	Samlet vurdering
	Ranging	Netto nårverdi (mill. nok)	Kostnad per tonn redusert CO <sub>2</sub> -utslipp	Ranging	Ranging totalt
1	2a Hydrogen	-1 000	5 084	2a Hydrogen	2a Hydrogen
2	3 Batteri	-1 488	7 363	3 Batteri	3 Batteri
3	2b Hydrogen med del-elektrifisering	-1 828	8 842	2b Hydrogen med del-elektrifisering	2b Hydrogen med del-elektrifisering
4	4 Elektrifisering	-2 045	10 244	4 Elektrifisering	4 Elektrifisering

# 11 Oppsummering av kostnader og effektmåloppnåelse

## 11.1 Kostnader

Alle tall er i millioner kroner.

### 11.1.1 Anskaffelseskostnader kjøretøy

Grunnkalkylen med påslag for usikkerhet iht. usikkerhetsanalysen gir følgende estimerte investeringskostnader til innkjøp av jernbanekjøretøy til de ikke-elektrifiserte banestrekningene som innspill til usikkerhetsanalysen.

Tabell 57 Estimerte investeringskostnader relatert til kjøretøyanskaffelser for de ulike konseptene. Kostnader i millioner kroner. Investeringskostnadene inneholder forventede kostnader til anskaffelsesprosjektene.

Togtype	0	2 A	2 B	3	4
Persontog – Regiontog	6 163	8 353	8 353	8 096	5 282
Persontog – Fjerntog	2 030	3 762	3 762	2 707	1 773
Godstog	1 979	6 672	6 672	5 506	1 861
<b>SUM Kjøretøykostnad</b>	<b>10 172</b>	<b>18 786</b>	<b>18 786</b>	<b>16 309</b>	<b>8 917</b>

### 11.1.2 Investeringskostnader infrastruktur

Grunnkalkylen med påslag for usikkerhet iht. usikkerhetsanalysen gir følgende estimerte investeringskostnader relatert til endring eller supplering av infrastruktur knyttet til de ikke-elektrifiserte banestrekningene som innspill til usikkerhetsanalysen..

Tabell 58 Estimerte investeringskostnader relatert til infrastruktur for de ulike konseptene. Kostnader i millioner kroner.

Infrastrukturelement	0	2 A	2 B	3	4
Hydrogen fyllestasjon og infrastruktur knyttet til fylling		3 202	3 202		
Verksted og beredskapstiltak		1 511	1 511	243	
Omformerstasjon			1 900	4 136	4 205
Kontaktledning og høyspentledning			1 466	7 228	15 217
Tilrettelegging av tunneler for elektrisering				32	9 284
Tilrettelegging av broer for elektrisering			150	1 312	3 797
<b>SUM investeringskostnad</b>		<b>4 712</b>	<b>8 228</b>	<b>12 951</b>	<b>32 504</b>

### 11.1.3 Driftskostnader kjøretøy

Grunnkalkylen med påslag for usikkerhet iht. usikkerhetsanalysen gir estimerte driftskostnader relatert til vedlikehold av kjøretøy og skifte av fremdriftsbatterier på de ikke-elektrifiserte banestrekningene, som vist i tabellen nedenfor. Andre driftskostnader er ikke vurdert da de anses like på tvers av alternativene.

Tabell 59 Estimerte årlige kostnader til vedlikehold av kjøretøy for de ulike konseptene. Kostnader i millioner kroner.

Togtype	0	2 A	2 B	3	4
Persontog – Regiontog	93	92	92	85	81
Persontog – Fjerntog	80	79	79	73	69
Godstog	113	152	152	141	98
<b>SUM Kjøretøykostnad</b>	<b>286</b>	<b>322</b>	<b>322</b>	<b>299</b>	<b>249</b>

Tabell 60 Estimerte kostnader for batterier per år for hvert konsept. Kostnader i millioner kroner.

Togtype	0	2 A	2 B	3	4
Persontog – Regiontog	1,7	6,9	6,9	19	0
Persontog – Fjerntog	0,36	1,4	1,4	4	0
Godstog	3,3	13	13	59	0
<b>SUM Batterikostnad</b>	<b>5,4</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>82</b>	<b>0</b>

### 11.1.4 Driftskostnader infrastruktur

Tabell 61 Driftskostnader for infrastruktur per år for hvert konsept. Kostnader i millioner kroner.

Infrastrukturelement	0	2 A	2 B	3	4
Lade- og fyllestasjoner		26	26		
Omformerstasjoner			5,3	12	14
Kontaktledning og høyspentledning			11	52	118
<b>SUM infrastrukturdrift</b>		<b>26</b>	<b>43</b>	<b>63</b>	<b>132</b>

### 11.1.5 Energikostnader

Tabell 62 Årlige utgifter til energi for de ulike konseptene. Kostnader i millioner kroner.

Togtype	0	2 A	2 B	3	4
Persontog – Regiontog	101	96	94	22	29
Persontog – Fjerntog	37	43	41	9	10
Godstog	183	190	182	40	44
<b>SUM Energikostnad</b>	<b>322</b>	<b>328</b>	<b>317</b>	<b>71</b>	<b>84</b>

## 11.2 Effektmåloppnåelse

Det presiseres at skalaen er benyttet til å vise forskjeller mellom konseptene med hensyn til de ulike effektmålene. Det innebærer at et pluss i én kategori ikke kan antas å veie opp (i relativ størrelse eller viktighet) for et minus i en annen kategori.

### 11.2.1 Reduserte klimagassutslipp innen 2030

Hvorvidt det er mulig å oppnå reduserte klimagassutslipp innen 2030 i de ulike konseptene avhenger i stor grad av hvilke forutsetninger som blir satt for beslutning, planlegging og gjennomføringen av konseptet. En gjennomgang av hva som skal til for å realisere overgang til ny energibærer innenfor hvert konsept viser at nødvendig tid til planlegging, bygging og anskaffelse av kjøretøy til sammen gjør det urealistisk med en full innføring av noen av konseptene før 2030. For det konseptet som har lavest behov for tiltak i infrastrukturen, konsept 2a Hydrogen, forventes det å ta lengst tid å anskaffe kjøretøy. For det konseptet hvor nye kjøretøy kan anskaffes raskest, konsept 4 Elektrifisering, er infrastrukturen den mest omfattende og forventes å ta lengst tid å realisere.

Det kan imidlertid være mulig å realisere en delvis overgang til ny energibærer innenfor hvert konsept innen 2030, som også vil gi effekt for klimagassutslippene fra jernbanen innen 2030. For hydrogen- og batterikonseptene består dette av piloter, der lån, leie eller svært tidseffektiv anskaffelse av nye kjøretøy kan gjøre det mulig å overføre trafikken til ny energibærer. For elektrifisering gjør eksisterende plangrunnlag det mulig å elektrifisere Støren-Steinkjer raskere enn øvrige deler av de ikke-elektrifiserte strekningene.

Det å realisere effekt før 2030 er imidlertid helt avhengig av tidlige og tydelige beslutninger om nettopp dette. Det er f.eks. anslått å ta fire år å planlegge og bygge kontaktledningsanlegg mellom Stjørdal og Steinkjer. Dersom dette skal settes i drift i løpet av 2029, må det bevilges midler til prosjektet senest i Statsbudsjettet for 2025. Ettersom den største usikkerhetsfaktoren er beslutningsprosessen, og denne er felles for konseptene, er alle konseptene gitt en svak positiv skår for dette effektmålet.

### 11.2.2 Reduserte klimagassutslipp innen 2050

Alle de nye energibærerne som vurderes vil ha null utslipp fra selve togtrafikken. All energi er forutsatt å ha sitt opphav i strøm fra fornybare kilder, ettersom det benyttes opphavssertifikater til strømforsyning på jernbanen. Det er forutsatt at det vil være krav til det samme for strøm som benyttes til hydrogenproduksjon (eller annen produksjonsmetode med nullutslipp). Gjennomsnittlig utslipp per år over en periode på 75 år er oppgitt i tabellen under.

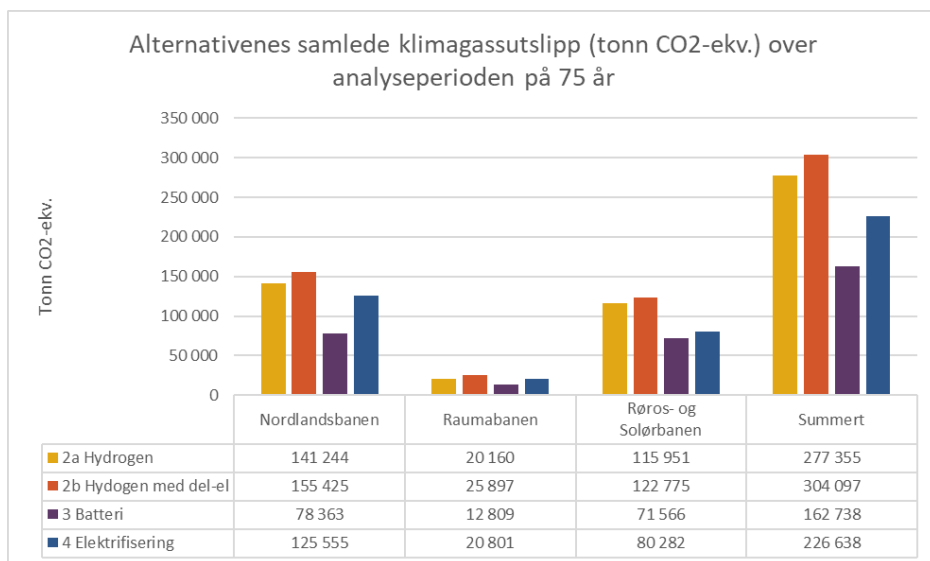
Tabell 63 Gjennomsnittlig utslipp per år over levetiden (75 år), per konsept. Inkluderer indirekte og direkte utslipp fra anleggs- og driftsfase.

Konsept	Utslipp per år (tonn CO <sub>2</sub> -ekv.)
0 Referanse	70 000
2a Hydrogen	3 700
2b Hydrogen med del-el.	4 100
3 Batteri	2 200
4 Elektrifisering	3 000

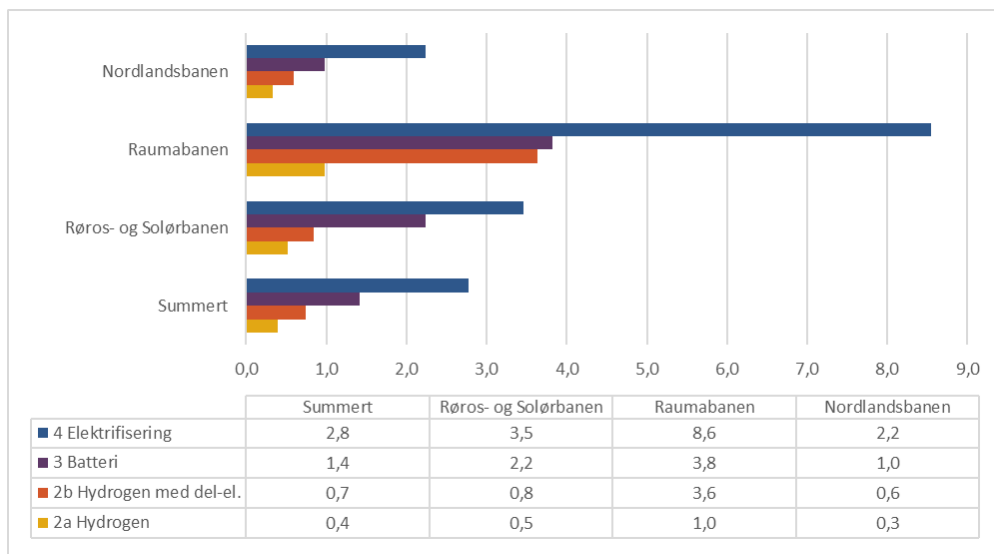
Det er noe variasjon i klimagassutslipp som følge av realiseringen av konseptet, dvs. utslipp fra tiltak i infrastruktur og produksjon av teknisk utstyr om bord i kjøretøyene, slik som batterier og brenselceller. Som vist i Figur 45 kommer konsept 3 batteri ut best på hver bane og på totalen. Dette skyldes hovedsakelig at alternativ 3 har lavere utslipp fra drift per år enn alternativ 2a/b, og lavere utslipp fra anleggsfasen enn alternativ 4. Forskjellene er allikevel relativt små sammenlignet med forventede utslipp fra trafikk i referansealternativet. Som vist i Figur 46 vil klimautslippet være spart inn fra 0,3-1 år for hydrogen (2a) og 2,2-8,6 år for elektrifisering. Dermed skårer konseptene likt på dette effektmålet.



Alle konseptene som er utredet i alternativanalysen i KVV GREEN vil bidra til netto reduksjon av klimagassutslipp. Dette skyldes at utslipp fra diesel som energibærer for trafikken i referansealternativet er betydelig større enn utslippene fra utbygging og vedlikehold i driftsfasen. På de aller fleste baner vil overgangen til ny energibærer, og utslippene som følger av dette, være innspart innen 2-3 år eller mindre fra idriftsettelse (med unntak av Raumabanen).



Figur 46: Samlede klimagassutslipp for hvert alternativ og bane.



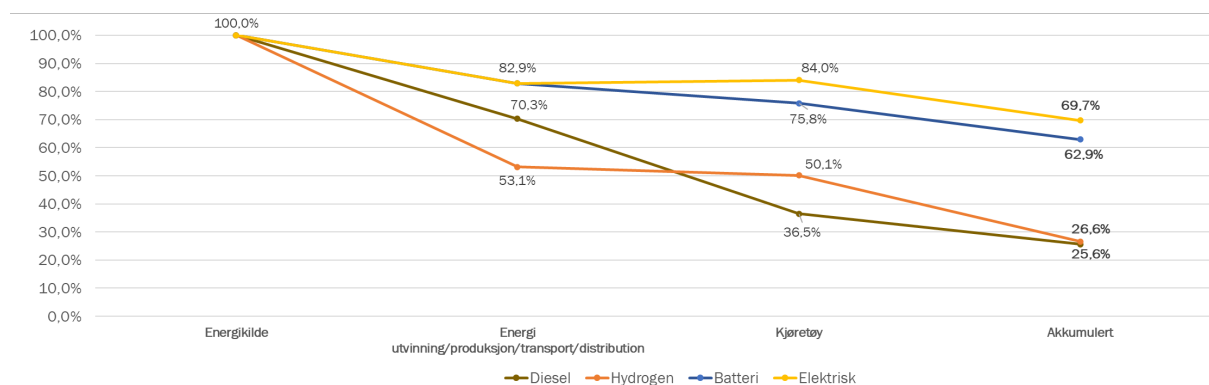
Figur 47: Tilbakebetalingstid for alle alternativ og baner.

### 11.2.3 Energieffektivitet

Alle alternativer skårer bedre enn referansealternativet på energieffektivitet. Hydrogenkonseptet er relativt likt dagens dieselkonsept på energieffektivitet om man måler direkte forbruk fra «well-to-wheel», men har vesentlig større potensiale for energioptimalisering i flere deler av kjeden, samt større muligheter for energibesparelser ved regenerativ kjøring enn dieselskjøretøyene.

Hydrogenalternativet med del-elektrifisering har mulighet for energieffektivitet tilsvarende elektrisk drift på de elektrifiserte strekningene. Dette bidrar til at dette alternativet får noe bedre skår på WTW-kriteriet.

Batterikonseptet fremstår bedre enn diesel- og hydrogenkonseptene, og nesten like bra som det fullelektriske alternativet. Batterikonseptet har større mulighet for å utnytte kapasiteten i batteriene ved kjøring enn alle de andre konseptene (se utfyllende argumentasjon i batterikapittelet).



Figur 48 Konseptenes eksemplifiserte energieffektivitet "well-to-wheel".

Alle de vurderte konseptene (unntatt referansealternativene) benytter elektrisitet som energikilde. Det norske forbruket av strøm er på 133 TWh [13]. Energiforbruket i alternativene er beregnet til mellom ca. 0,1 til 0,2 % av totalmarkedet. Alternativene anses derfor ikke å benytte en uforholdsmessig stor andel av en knapp energiressurs – som potensielt kan motvirke omstilling i andre sektorer, og vektas dermed likt som referansealternativet (som benytter ca. 0,2 % av det norske markedet for fossilt drivstoff [21]).

Ikke-fossil diesel ble sortert ut tidlig i alternativanalysen, blant annet på grunn av manglende måloppnåelse knyttet til forbruk av knappe ressurser (beregnet å kunne forbruke 4,4 % av det norske markedet for ikke-fossilt drivstoff).

#### 11.2.4 Togtilbudets attraktivitet

Flere av de egenskaper som følger av muligheten for å trekke energien direkte fra kontaktledningen (hel- og del-elektrifiseringsalternativene) gir fordeler for akselerasjonsevne og trekraft, og begrenser behov for energilagring om bord (effektiv tog lengde). Konseptenes skår for attraktiviteten i togtilbudet øker dermed i proporsjon med graden av elektrifisering som forutsettes i konseptet. For togtilbudets attraktivitet skårer alle konsepter likt for lade- og tankestopp, som har vist seg å ikke være nødvendig i noen konsepter. De skårer også likt for aksellast, da det forventes å være mulig å bygge lokomotiver med nye energibærere (inkludert batteri) uten å overskride 20,5 tonn aksellast.

#### 11.2.5 Oppsummering av effektmåloppnåelse

Konseptenes effektmåloppnåelse kan oppsummeres i prioritets rekkefølge slik:

Konsept 4 – Elektrifisering, fremstår som det beste alternativet i forhold til effektmålene, da det jevnt over gir lik eller høyere skår enn alle de andre konseptene. Spesielt for energieffektivitet, akselerasjonene, trekraft og effektiv tog lengde skårer det bedre enn alle de andre alternativene.

Konsept 3 – Batteri, fremstår som det nest-beste konseptet av samme grunn, selv om det skårer noe lavere enn referansealternativet på effektiv tog lengde (men dette kriteriet har lavere prioritet). Konseptet skårer bedre enn alle andre alternativer enn konsept 4 på energieffektivitet, akselerasjonene og trekraft,

Konsept 2 – Hydrogen, skårer bedre enn referansealternativet på de viktigste effektmålene, CO<sub>2</sub>-utslipp og energieffektivitet, Del-elektrifiseringsalternativet skårer litt bedre enn det rendyrkede hydrogenalternativet på energieffektivitet. Konseptet skårer dårligst av alle på effektiv tog lengde, og er dårligere enn alle andre nye energibærerkonsepter på energieffektivitet, akselerasjonsevne og trekraft.

Tabell 64 Oversiktstabell effektmåloppnåelse for de ulike konseptene. Gult/0 betyr likt som i referanse, mørkere grønn og flere + betyr økende grad av bedre måloppnåelse enn referansealternativet og mørkere oransje/rød – betyr lavere grad av måloppnåelse enn referansealternativet.

Effektmål	Vurderingsmetode	0	2 A	2 B	3	4
1. Utslipp innen 2030	Beregnet CO <sub>2</sub> -utslipp	0	(+)	(+)	(+)	(+)
2. Utslipp innen 2050	Beregnet CO <sub>2</sub> -utslipp	0	+++	+++	+++	+++
3. Energieffektivitet	Energieffektivitet WTW	0	+	+ (+)	++(+)	+++
	Forbruk av knappe ressurser	0	0	0	0	0
4. Attraktivitet	Akselerasjonsevne	0	0	+	++	+++
	Trekraft	0	0	+	++	+++
	Lade- og tankestopp	0	0	0	0	0
	Effektiv tog lengde	0	-	-	(-)	+
	Aksellast	0	0	0	0	0

Tabell 65 Oppsummering av måloppnåelse for effektmål spesifisert med verdier for hvert hovedkonsept.

Effektmål	Fossil diesel		Ikke fossil diesel		Hydrogen		Batteri		Elektrifisering	
	Verdi	Skår	Verdi	Skår	Verdi	Skår	Verdi	Skår	Verdi	Skår
1. Beregnet CO <sub>2</sub> utslipp innen 2030	70 000	0	70 000	0	<70 000	(+)	<70 000	(+)	<70 000	(+)
2. Langsiktige CO <sub>2</sub> utslipp (innen ca. 2050)	70 000	0	70 000	0	3 700 4 050	+++	2 200	+++	3 000	+++
3. Energi-effektivitet WTW	25,60 %	0	Varierer		24-35 %	+ *	63 %	++(+)	70 %	+++
3. Forbruk av knappe ressurser	0,2 %	0	4 %	--	0,2 %	0	0,1 %	0	0,1 %	0
4. Akselerasjons- evne	Referanse	0	Som 0-alt.	0		+		++		+++
4. Trekraft	Referanse	0	Som 0-alt.	0		+		++		+++
4. Lade-og- tankestopp	Referanse	0	Som 0-alt.	0		0		0		0
4. Effektiv toglengde	Referanse	0	Som 0-alt.	0		-		(-)		+

\* For Hydrogen med deelektrifisering er skåren ++(+)

# 12 Oppsummering av teknologisk modenhet

De vurderte alternativene har ulik teknologisk modenhet, TRL-nivå. Følgende tabell oppsummerer den forventede teknologiske modenheten for ulike teknologier som inngår i konseptene.

De primære kildene for TRL-vurderingene er RFlen som er gjennomført, samt kontakt med kjøretøyprodusenter underveis i gjennomføringen av prosjektet. Et TRL-nivå på 9 tilsier at teknologien er kommersielt tilgjengelig og har vært i bruk over tid under kommersielle rammer. Et TRL-nivå på 7 tilsier at det finnes fullskala prototype i markedsrelevant skala, mens for TRL 6 er det kun pilotskala som er vurdert under relevante driftsbetingelser. For TRL 5 er teknologien bare testet i laboratorieskala.

Tabell 66 Oppsummering av teknologisk modenhet (TRL-nivå) for ulike kjøretøytyper i hvert av konseptene

	0 Fossil diesel	2 Hydrogen	3 Batteri	4 Elektrifisering
TRL for regiontog i distrikt (55 m)	9	8/9*	8/9*	9
TRL for regiontog (110 m)	9	8/9*	8/9*	9
TRL for fjerntog (220 m)	9	6	6	9
TRL for godslokomotiv	9	5	7	9
TRL for energivogn	Ikke tillatt	6	6	Ikke relevant

\* Teknologien er å anse som moden, men er ikke prøvd ut eller tatt i bruk under norske forhold.

Som tabellen over viser, er teknologien å anse som moden for de kortere kjøretøyene til persontrafikken også for de nye energibærerne hydrogen og batteri. Det er imidlertid en forskjell knyttet til erfaring med ulike driftssituasjoner, ettersom det ikke foreligger erfaring med bruk over tid av hydrogen- og batterikjøretøy under norske forhold. Driftssituasjonen i Norge, med hensyn til bl.a. vintertemperaturer og snømengder er annerledes enn andre deler av Europa. Til sammenligning har man flere tiår med erfaring med drift av diesel og elektriske kjøretøy i Norge.

For de lange fjerntogene, samt for godslok og energivogner er teknologien mindre moden for de nye energibærerne. Piloter er gjennomført under relevante nok driftsbetingelser for både fjerntog og energivogner. For godslokomotiver er det en forskjell mellom hydrogen- og batterilokomotiver, der hydrogenlokomotiver framstår som en mindre moden teknologi enn batterilokomotiver.

Vurderingen av TRL-nivå over tar hensyn til modenheten på selve kjøretøyene og relevante erfaring med drift generelt, inkludert operasjonsmanualer og driftsprosedyrer. Status på regelverksutviklingen inngår imidlertid ikke i vurderingen. Regelverket for bruk av hydrogen og batteri på jernbanen er ikke ferdig utviklet, og det kan forventes utvikling i dette i årene som kommer.

Modenheten for kjøretøy med hydrogen og batteri vurderes som lik for alle kjøretøykategorier, unntatt godslokomotiv, der batteri har et TRL-nivå på 7, og hydrogen på 5. Risikobildet framstår allikevel som noe annerledes som følge av at man er avhengig av stor markedsinteresse for å sikre fortsatt modning av teknologiene og for å redusere kostnadene. Driftskostnadene er høyere for hydrogenkjøretøy enn for batterikjøretøy, samtidig som den tekniske kompleksiteten er høyere (hydrogenkjøretøy har hydrogentank og brenselceller i tillegg til batterier). Det anses dermed at det er høyere risiko for at utviklingen av hydrogenkjøretøy for jernbanen ikke vil bli som forventet, enn det er for batterikjøretøy.

# 13 Arbeidsmaskiner og skiftelokomotiver

Arbeidsmaskiner på jernbanen brukes for bygging av infrastruktur, og for å opprettholde jernbanens tilgjengelighet. Dette innebærer både vedlikehold av infrastrukturen, og andre oppgaver knyttet til driften. Oppgaver knyttet til driften kan være beredskapsoppgaver som feilretting, snørydding etc. Arbeidsmaskinene består overordnet av flere typer maskiner, slik som biler, anleggsmaskiner uten skinnehjul, påsporbare maskiner, skinne-/veimaskiner og rent skinnegående arbeidsmaskiner. Denne delen av utredningen omfatter de rent skinnegående arbeidsmaskinene, samt skiftelokomotiver som benyttes på godsterminaler og som trekraft ved drift og vedlikehold i infrastrukturen. For hjulgående arbeidsmaskiner pågår det allerede prosesser for klimagassreduksjoner som det forutsettes at jernbanesektoren deltar i, på lik linje med den øvrige anleggsektoren.

De skinnegående arbeidsmaskinene opererer i dag både på elektrifiserte og ikke-elektrifiserte strekninger, med unntak av arbeidsmaskiner for bygging og vedlikehold av kontaktledningsanlegg, som kun opererer på de elektrifiserte strekningene. De elektrifiserte banene har størst trafikk, og på disse utføres størst andel arbeid på jernbanen. Anslagsvis stammer 80 % av de skinnegående arbeidsmaskinenes CO<sub>2</sub>-utslipp fra vedlikehold og drift utført av dieseldrevne arbeidsmaskiner på strekninger som allerede er elektrifiserte [22]. Det finnes ikke nedbrutte tall per eiere og/eller type arbeidsmaskin.

Arbeidsmaskiner og skiftelokomotiver har andre forutsetninger, behov og krav når det gjelder bruksmønster og arbeidsoppgaver, variasjon innen type maskiner, behov for fleksibilitet, tidsperspektiv og eier-/brugerstruktur enn kjøretøy for person- og godstransport. Eksempelvis har arbeidsmaskiner behov for å kunne ta seg frem på alle jernbanestrekninger i avvikssituasjoner, og å ha tilstrekkelig energikapasitet om bord til å utføre nødvendige arbeidsoperasjoner. Ettersom 80 % av utslippene fra skinnegående arbeidsmaskiner stammer fra de allerede elektrifiserte strekningene, vil det kunne være andre tiltak for utslippsreduksjoner som er aktuelle for arbeidsmaskiner og skiftelokomotiver, enn for person- og godstog på strekninger som ikke er elektrifiserte. Det er også slik at skinnegående arbeidsmaskiner, hver for seg, har betydelig lavere utslipp enn person- og godstog, slik at det ikke er funnet hensiktsmessig å la arbeidsmaskiner og skiftelokomotiver være førende for valg av konsept for person- og godstogene. I utredningen er arbeidsmaskiner og skiftelokomotiver derfor ikke inkludert i alternativene som er utarbeidet for person- og godstransport, men håndtert ved hjelp av supplerende vurderinger til alternativene for person- og godstransport.

I dette kapitlet gjennomgås ulike typer skinnegående arbeidsmaskiner og skiftelokomotiver, og ulike kilders vurdering av potensialet for å redusere utslipp med energibærerne hydrogen, batteri og elektrisitet. Potensialet for utslippsreduksjoner er begrenset til utslipp fra dieselmotoren, og omfatter ikke andre mulige kilder til utslipp. Deretter vurderes teknologisk modenhet for disse energibærerne for skinnegående arbeidsmaskiner og skiftelokomotiver, eventuelle særskilte konsekvenser for arbeidsmaskiner og skiftelokomotiver ved innføring av de ulike alternativene for person- og godstrafikk på ikke-elektrifiserte strekninger, samt korte diskusjoner av tilfredstillelse av rammebetingelser og tidsperspektiv. Til slutt presenteres et sammendrag basert på den tilgjengelige informasjonen. Biodrivstoff er ikke vurdert som energibærer for arbeidsmaskiner av de samme årsakene som for utredningen ellers. Dieseldrevne arbeidsmaskiner og skiftelokomotiver vil uansett benytte samme innblanding av biodrivstoff som øvrige dieselskjøretøy i jernbane- og anleggssektoren.

## 13.1 Arbeidsmaskiner og skiftelokomotiver på den norske jernbanen

Maskinene som er omfattet av denne delen av utredningen er kategorisert iht. Tabell 63. Kategoriene har ulike energi- og effektbehov, og er inndelt i kategorier etter dette. Tabellen angir også antall maskiner i de ulike kategoriene, samt CO<sub>2</sub>-utslipp fra maskiner i de aktuelle kategoriene for dagens situasjon med dieseldrift. Som følge av manglende tilgang på data omfatter tallene som angis for CO<sub>2</sub>-utslipp Bane NOR sine kjøretøy alene, og viser dermed ikke et komplett bilde av de totale utslippene for maskinene i de ulike kategoriene.

Tabell 67: Kategorisering av arbeidsmaskiner og skiftelokomotiver. Merk at antallet kjøretøy som er vist for de største eierne av arbeidsmaskiner, dvs. Bane NOR og Baneservice. For skiftelokomotiver vises lokomotiver som eies av CargoNet AS og Onrail AS. Som følge av manglende tilgang på data er tall for CO<sub>2</sub>-utslipp vist kun for Bane NOR sine kjøretøy.

Kategori	Energibehov/ effektbehov	Størst eier i rekkefølge	Type arbeidsmaskin og antall på elektrifiserte baner	Type arbeidsmaskin og antall på ikke- elektrifiserte baner	Cirka antall totalt <sup>33</sup>	CO <sub>2</sub> -utslipp fra Bane NOR sine kjøretøy (Tonn CO <sub>2</sub> - ekv. est. 2021) [23]
A	Lav-medium 1	Bane NOR: 44 stk. Baneservice: 5 stk.	Lastetraktorer (mange)	Lastetraktorer (få)	49	2 084
B	Medium 1	Bane NOR: 19 stk. Baneservice: 4 stk.	Ledningsvogner (mange)	Ledningsvogner (ingen)	23	504
C	Høyt	Baneservice: 9 stk. Bane NOR: 9 stk. Grenland Rail	Bane NOR: Høyfjellsfres (3 stk.) Linjelokomotiver (6 stk.)  Baneservice: Sporjusteringsmaskiner (6 stk.) <sup>34</sup> Spesialmaskiner (3 stk.)		18+	879
D	Medium 2	Bane NOR: 7 stk.	Bane NOR: Vedlikeholdstoget (1 stk.) Brann- og redningstoget (1 stk.) Målevogner (2 stk.) Spesialmaskiner (3 stk.)		7	157
Skifte- lokomotiver for gods- terminaler	Lav-medium	CargoNet AS: 15 stk.  OnRail AS: 2 stk.	CargoNet AS: Type SKD 226 (11 stk.) Type SKD 224 (3 stk.) Type BR261 (1 stk.)  OnRail AS: Type T44 (2 stk.) <sup>35</sup>		17	Ikke tilgjengelig

Lastetraktoren, kategori A, er den typen arbeidsmaskin det finnes klart flest av. Lastetraktorene er utstyrt med f.eks. snøfreser, plog, kran og sporranser, og benyttes til linjearbeid og visitasjoner. Bane NOR estimerer basert på egne eide kjøretøy at det er lastetraktorene som står for den største delen av kilometerproduksjonen blant arbeidsmaskinene, med høyere kilometerproduksjon enn alle de andre arbeidsmaskinene til sammen. Etter lastetraktorer er det ledningsvogner det finnes flest av. Ledningsvogner, kategori B, brukes til arbeid med kontaktledningsanlegget, og benyttes kun der banen er elektrifisert. I kategori C og D er typen maskiner mer sammensatt, og det finnes generelt færre maskiner av den enkelte type. Det finnes eksempelvis 3 høyfjellsfreser som benyttes til å fjerne snø fra skinnegangen, ett vedlikeholdstog til utførelse av vedlikeholdsoperasjoner i områder med dobbeltspor og trafikk på nabosporet, og ett brann- og redningstog i beredskap. I tillegg finnes seks linjelokomotiver som benyttes som trekkraft, målevogn for målinger og kontroll av jernbaneinfrastrukturen, sporjusterings- og pakkmaskiner som brukes for vedlikehold av skinnene og underbyggingen, pukksuger som brukes for vedlikehold av underbyggingen og snøkostemaskin for rydding av snø vinterstid. Målevogna kjører gjennom

<sup>33</sup> Notat om arbeidsmaskiner og skiftelokomotiver i Alternativanalysen, Jernbanedirektoratet, rev. 1, 5.mai 2023.

<sup>34</sup> Baneservice har i 2023 bestilt 2 stk. hybrid diesel-kontaktledning sporjusteringsmaskiner (pakkmaskiner)

<sup>35</sup> Grenland Rail har mange linjelokomotiver/skiftelokomotiver som blant annet benyttes til trekkraft i tilknytning til arbeidsmaskiner. Disse benyttes også til godstransport.

hele det norske jernbanenettet flere ganger i året. Der det er elektrifisert bane måler den trykket mellom strømvogner og kontaktledning, samt høyde mellom skinneoverkant til kontaktledning. Revisjonsvogn regnes som en spesialmaskin og benyttes til tilsyn og vedlikehold av kontaktledning, og må noen ganger kunne kjøre på strekninger uten spenningsatt kontaktledning.

Skiftelokomotiv benyttes i hovedsak på godsterminalene, der de utfører skifteoperasjoner på vognstammer. Spor inne på terminalområdet er generelt ikke elektrifisert, og skiftelokene er i dag dieseldrevet. Hver godsoperatør har ansvar for eget driftsopplegg, noe som innebærer at de selv må sørge for at tjenesten utføres. Dette blir gjort enten ved å kjøpe eller leie/lease inn kjøretøy og kompetanse, eller ved å kjøpe tjenesten fra underleverandører.

### **Eiere og brukere av arbeidsmaskiner og skiftelok**

Drift og vedlikehold på jernbanen utføres av Spordrift AS og en rekke andre selskaper. I tillegg finnes flere aktører som eier kjøretøy for utleie til virksomheter som utfører drift og vedlikehold. Det finnes derfor en rekke ulike eiere av skinnegående arbeidsmaskiner, og i Bane NOR sitt materiellregister er det registrert både skinnegående kjøretøy og skinne-/veimaskiner fra opp mot 100 ulike eiere med smått og stort [23]. Dette kan være kjøretøyeiere, anleggsentreprenører, finansinstitusjoner eller norske eller utenlandske organisasjoner som selv bruker maskinene. Bane NOR Transport og Baneservice AS er de største eierne av sporbundne arbeidsmaskiner i Norge.

Skiftelokomotiv som opererer på godsterminaler opereres av de enkelte godsoperatørene på terminalene. Skiftelokene eies av godsoperatørene selv, leies eller leases fra leasingselskaper, eller eies av underleverandører. Linjelokomotiver benyttes også til skifting, og noen godsterminaler har derfor ikke dedikerte skiftelokomotiver.

## **13.2 Muligheter for utslippsreduksjoner fra arbeidsmaskiner og skiftelokomotiver**

Kartlegging av muligheter for utslippsreduksjoner fra arbeidsmaskiner og skiftelokomotiver er basert på tidligere gjennomførte arbeider. Spesielt gjelder dette rapporter om arbeidsmaskiner utarbeidet av Bane NOR og Jernbanedirektoratet i forbindelse med utredningen NULLFIB 2 [24]. Det er også sendt ut en forespørsel om informasjon (RFI) til leverandører av aktuelle maskiner, samt at det er gjennomført et arbeidsverksted i KVVU GREEN med eiere og brukere av arbeidsmaskiner på jernbanen. Funnene fra de ulike kildene blir presentert i påfølgende delkapitlene.

### **13.2.1 Relevante funn fra NULLFIB2**

I dette kapitlet oppsummeres relevante funn fra Bane NORs og Jernbanedirektoratets utredninger i forbindelse med NULLFIB2.

I NULLFIB2 ble Bane NOR engasjert til å utrede utslippsreduksjoner for arbeidsmaskiner på jernbanen, som resulterte i rapporten «Mulighetsstudie for å oppnå utslippsreduksjon fra arbeidsmaskiner i periodene frem til 2030 og 2050», ref. fotnote **Feil! Bokmerke er ikke definert.** I arbeidet med utredningen har Bane NOR kun vurdert egne maskiner.

Mulighetsstudien kartla fire ulike scenarier (0-3) som har fellestrekk med firetrinnsmetodikken hva angår ambisjonsnivå og investeringsbehov. Scenario 0 og 1 ser på henholdsvis å minske utslipp ved endret bruk og ved å bytte ut fossilt diesel med avansert biodrivstoff. Følgende tiltak er presentert i scenario 0 endret bruk:

- Optimalisering av vedlikehold
- Alternative måter å utføre den samme arbeidsoppgaven på
- Optimalisert kjøring og mindre tomgangskjøring
- Kjøretøypool for internt og eksternt arbeid.

Bruk av avansert biodrivstoff er silt ut i KVVU GREEN som følge av manglende effektmåloppnåelse som sektorspesifikt tiltak. Funn fra scenario 1 er derfor heller ikke relevant å se videre på i relasjon til arbeidsmaskiner og skiftelokomotiver.

Løsningene som utredes i scenario 2 og 3 er moderat og proaktiv tilnærming til utskifting til nye energibærere. Den moderate tilnærmingen er å undersøke om det finnes egnede nullutslippsløsninger i

markedet ved nyanskaffelser og utskiftning av arbeidsmaskiner. Den proaktive tilnærmingen innebærer å sette av nok midler til å stille krav om nullutslippsløsninger til leverandørmarkedet, og å skifte ut dieselskjøretøy før forventet levetid. Med tilnærmingen i scenario 3 finner utredningen at utslippene vil kunne reduseres med 59 % innen 2030 og 83 % innen 2050.

Kartlegging av klimagassutslipp viser at direkte utslipp fra drift og vedlikehold (inkl. fornyelse) er i størrelsesorden 20 000 tonn CO<sub>2</sub> årlig. Av dette er Bane NORs egneide kjøretøypark estimert til utslipp på ca. 3600 tonn CO<sub>2</sub>. De har satt et mål om å redusere sine egne utslipp fra drift og anleggsvirksomhet med 40 % sammenlignet med 2019-nivå innen 2030. Dette er mindre enn ambisjonsnivået for KVVU GREEN (55 %) og monner uansett lite når Bane NOR kun står for om lag 18 % av utslippene fra arbeid og vedlikehold på jernbanen.

Kjøretøy som kan utnytte kontaktledningsanlegget allerede i dag er bl.a. lokomotiver, revisjonsvogn/ledningsvogn og målevogn. Utskiftning av disse vil være «lavhengende frukter» for Bane NOR for å oppnå nullutslipp på elektrifiserte banestrekninger.

Jernbanedirektoratets rapport «CO<sub>2</sub>-utslippsreduksjoner fra skinnegående arbeidsmaskiner» [22] beskriver at om lag 80 % av CO<sub>2</sub>-utslippene fra skinnegående arbeidsmaskiner skjer på elektrifiserte baner. Denne informasjonen skisserer en mulighet for betydelige utslippsreduksjoner dersom dieseldrevne arbeidsmaskiner byttes ut med tilsvarende som kan benytte kontaktledning og arbeide med spenningsatt kontaktledning.

Videre identifiseres det at kapasiteten på batteriene kan være en begrensning der det ikke finnes kontaktledning. Norske forhold og vinterdrift fører til at vi ikke nødvendigvis kan anskaffe hylleware nullutslippskjøretøy fra andre land. Som en del av teknologimodningsprosessen, foreslår Jernbanedirektoratet at det gjennomføres pilotprosjekter.

I konklusjonen til rapporten «CO<sub>2</sub>-utslippsreduksjoner fra skinnegående arbeidsmaskiner» påpekes det også at informasjonsgrunnlaget for utslippstall fra jernbanesektoren er ufullstendig, og at det bør etterstrebes å få et mer korrekt informasjonsgrunnlag på plass. Det vil ikke være mulig å gjøre gode beregninger og evaluering av måloppnåelse dersom det ikke foreligger en mer komplett oversikt over sektorens utslipp.

### **13.2.2 Arbeidsverksted om arbeidsmaskiner i KVVU GREEN**

For å kartlegge behov hos brukerne av arbeidsmaskiner og få deres innspill på muligheter og utfordringer med de ulike teknologiske løsningene, ble det arrangert et arbeidsverksted med representanter fra Bane NOR, Baneservice, Spordrift og Jernbanedirektoratet. Informasjonen i dette kapitlet er aggregert fra informasjonen som framkom og ble dokumentert under dette arbeidsverkstedet<sup>36</sup>. Informasjonen som framkom i arbeidsverkstedet utgjør et supplement til annen informasjon som har blitt innhentet i arbeidet med KVVU-en, og er basert på den informasjonen og erfaringen deltakerne på arbeidsverkstedet hadde ved gjennomføringen.

Følgende momenter ble i arbeidsverkstedet funnet å være hovedtemaer ved skifte av energibærer fra diesel. I det videre diskuteres disse for ulike energibærerne opp mot arbeidsmaskinkategoriene beskrevet i kapittel 12.1.

- 1) Sikkerhet  
Kombinasjonen av enkelte energibærere og funksjonene som utføres av enkelte arbeidsmaskiner kan være opphav til potensielle sikkerhetsutfordringer som fører til at kjøretøyene ikke ville blitt godkjent på grunn av fare for liv og helse.
- 2) Volum og energibehov  
De ulike energibærernes tekniske løsninger for lagring og omgjøring til energi som kan bli brukt av utstyret ombord opptar ulik mengde plass. Arbeidsmaskinene har også ulikt energibehov, og behovet for lagringsplass/tank vil derfor også være forskjellig. Det omtales i hvilken grad energibehov sett opp mot lagringsplass utgjør en utfordring.
- 3) Tilgjengelighet  
Energibærere som må tankes har behov for påfyllingsanlegg. For å holde kostnadene nede

---

<sup>36</sup> Arbeidsmaskiner i KVVU GREEN – Oppsummering av verksted 12.01.2023, 01 Høringsversjon datert 24.01.2023.



tilstrebes det også å holde antallet påfyllingsanlegg nede. Arbeidsmaskiner kjører både på elektrifisert og ikke-elektrifiserte baner og påfyllingsanlegg er primært tenkt utbygd for den ordinære driften på ikke-elektrifiserte strekninger. Arbeidsmaskiner som har en stor aksjonsradius, og dermed har behov for tankestopp mange steder på jernbanenettet, vil derfor være mindre egnet for energibærere som krever opprettelse av påfyllingsanlegg over hele jernbanenettet.

## Hydrogen

Gruppen som deltok på arbeidsverkstedet hadde liten erfaring med hydrogen, og deres vurderinger er basert på den informasjonen som var tilgjengelig for dem. Hydrogen ble i arbeidsverkstedet vurdert som en løsning som kan gi en del utfordringer for arbeidsmaskiner, primært knyttet til pris, energieffektivitet og økt lagringsvolum sammenlignet med anleggsdiesel, samt sikkerhetsutfordringer i driften for enkelte typer arbeidsmaskiner.

I tillegg til sikkerhetsaspektet, dreide den største diskusjonen seg om at hydrogen som energibærer vil kreve et system for transport av hydrogen til arbeidsstedet. Maskinene jobber gjerne kontinuerlig mange timer i strekk, og krever tidseffektiv fylling av drivstoff der arbeidsmaskinen jobber for å utnytte tiden. Dette vil kreve fyllestasjoner over hele landet, noe som er økonomisk krevende dersom det kun er et lite antall kjøretøy som benytter hydrogen. Bruk av hydrogen kan også kreve tilpasninger av verksteder/bygg for å bli sikkerhetsmessig godkjent.

Videre var også tilgjengelig volum for energilagring i maskinene en bekymring. Plass til utstyr, last og mannskap er en begrensende faktor på en del arbeidsmaskiner, og økt bruk av den tilgjengelige plassen til lagring av energi er en ulempe. For å løse dette kan det være aktuelt å ta med en tankvogn med ekstra hydrogen. Dette vil imidlertid gi utfordringer når maskinen skal kjøre tilbake fra arbeidsstedet, da vognen står på feil side av arbeidsmaskinen.

For de konkrete arbeidsmaskinkategoriene er vurderinger som ble gjort på arbeidsverkstedet gjengitt i Tabell 66.

*Tabell 68: Vurdering i arbeidsverksted av hydrogen som energibærer for arbeidsmaskiner i de ulike arbeidsmaskinkategoriene. Hovedutfordringene som vurderes for de ulike energibærerne er 1) sikkerhet, 2) volum og energibehov og 3) tilgjengelighet på energibærer. For nærmere beskrivelse av hovedutfordringene, se kapittel 12.1.1.*

Arbeidsmaskinkategori	Vurdering i arbeidsverksted
<b>A</b> Lastetraktorer	<p>Sikkerhet kan være en utfordring, eksempelvis kan gnister forekomme ved arbeid.</p> <p>Antatte utfordringer knyttet til energibehov (volum) og plass til energibærer på kjøretøyet.</p> <p>Lastetraktorer benyttes over hele jernbanenettet og har behov for utbredt tilgang til påfyllingsanlegg eller mobil energiforsyning.</p>
<b>B</b> Revisjonsvogn/ledningsvogn	<p>Sikkerhet kan være en utfordring, eksempelvis kan gnister forekomme ved arbeid.</p> <p>Denne typen kjøretøy har relativt lavt energibehov, og det antas derfor ikke volumrelaterte utfordringer knyttet til energibehov.</p> <p>Revisjonsvogn benyttes over hele det elektrifiserte jernbanenettet og har behov for utbredt tilgang til påfyllingsanlegg eller mobil energiforsyning.</p>

<p><b>C</b> Maskiner med høyt energibehov og høyt effektbehov: høyfjellsfres, sporjusterings- og pakkmaskiner, linjelok, pukksuger, m.m.</p>	<p>Dette er en kategori sammensatt av mange ulike kjøretøystyper. For mange av dem ble ikke sikkerhet sett som en utfordring, men det må granskes for hver enkelt type.</p> <p>Antatte utfordringer knyttet til energibehov (volum) og plass til energibærer på kjøretøyene, grunnet høyt energibehov som fellesnevner. Hydrogen ville vært mest aktuelt som energibærer for transportetapper for f.eks. linjelokomotiv, dersom det er plass til nok energi.</p> <p>For kjøretøy som snøfresere som på vinterstid må brukes i hele Norge, vil hydrogen være mindre aktuelt grunnet hyppig behov for påfyllingsstasjoner. Høyfjellsfresere har mindre aksjonsradius og kunne vært mer aktuelt dersom den kunne tanke nok energi.</p>
<p><b>D</b> Annet: Vedlikeholdstoget, brann- og redningstoget, målevogn, snøkostemaskin</p>	<p>Dette er en kategori sammensatt av mange ulike kjøretøystyper. For enkelte av dem ble ikke sikkerhet sett som en utfordring, men det må granskes for hver enkelt type. Eksempelvis kan det bli utfordringer dersom branntoget skal benytte hydrogen.</p> <p>Disse kjøretøytypene må ha mulighet til energiforsyning hvor som helst på jernbanenettet.</p>

## Batteri

Batterier har enda ikke stor nok energikapasitet til å være eneste energikilde for alle typer arbeidsmaskiner. På jernbanen har mange arbeidsmaskiner lange perioder med drift der maskiner går på tomgang, eller med lavt energibehov. Batterier er velegnet som løsninger for å holde varme og togradio osv. i gang, og er godt egnet som sekundær energikilde når det ikke kreves store energimengder. På den måten kan en eventuell større hovedmotor med bruk av diesel startes kun for kjøring, noe som også vil spare vedlikehold av maskinene. Motorene er utstyrt med en timeteller som angir behov for vedlikehold, og tomgang kan utgjøre en stor andel av tiden. For vedlikeholdstoget og andre kjøretøy som brukes mye i stillstand med motorer i drift, så ble det vurdert at batteri vil gi fordeler med hensyn til arbeidsmiljø.

Bruk av batterier som energibærer krever en form for ladesystem, og valg av ladesystem vil være viktig. Som for person- og godstrafikk kan det være aktuelt med lading i bevegelse på ladestrekninger eller lading i stillstand. Arbeidsmaskiner har imidlertid et annet bruksmønster og andre behov enn person- og godstransport, og for disse kan det også være aktuelt med batteribytte i form av standardiserte batteripakker som kan brukes av arbeidsmaskinene, og som er utplassert på strategiske punkter. Det kan også være aktuelt med energivogner (med eller uten utstyr for egen lading) som kan brukes sammen med andre maskiner. Det krever imidlertid at arbeidsmaskinen er elektrisk, ikke rent mekanisk. Som for hydrogenkonseptet så vil en energivogn imidlertid gi utfordringer når maskinen skal kjøre tilbake fra arbeidsstedet, da vognen står på feil side av arbeidsmaskinen. Å kjøre med energivogn først er en utfordring med tanke på krav til sikt ved fremføring, og vil ikke være mulig etter innføring av ERTMS så lenge energivognen ikke utrustes med nødvendig utstyr.

For de konkrete arbeidsmaskinkategoriene er vurderinger som ble gjort på arbeidsverkstedet gjengitt i Tabell 67.

Tabell 69: Vurdering av batteri som energibærer for arbeidsmaskiner i de ulike arbeidsmaskinkategoriene. Hovedutfordringene som vurderes for de ulike energibærerne er 1) sikkerhet, 2) volum og energibehov og 3) tilgjengelighet på energibærer. For nærmere beskrivelse av hovedutfordringene, se kapittel 12.1.1

Arbeidsmaskinkategori	Vurdering i arbeidsverksted
<p><b>A</b> Lastetraktorer</p>	<p>Hybrid batteri og elektrisk vil være godt egnet sikkerhetsmessig, da batteriet tas i bruk når det ikke er forsvarlig å være koblet til kontaktledning.</p> <p>Når batteri skal benyttes under energikrevende arbeid, kan det være behov for kunne lade innimellom eller bytte batteri.</p> <p>Tilgjengeligheten på strøm til lading er utbredt, men det må vurderes i det videre hvordan lading ved anleggsområder avvikles, eller om ekstra batterier kan enkelt medbringes.</p>
<p><b>B</b> Revisjonsvogn/ledningsvogn</p>	<p>Det ble i arbeidsverkstedet ikke vurdert å være sikkerhetsutfordringer med batteridrift av revisjonsvogn.</p> <p>Revisjonsvogn benytter ikke veldig mye energi og kan lade batterier på kjørestrekninger hvor kontaktledning er tilgjengelig. Enkelte av oppgavene krever at kontaktledningsanlegget ikke er strømsatt, og det må tilses at kjøretøyene kan lade på veien dit eller kan bytte batteri ved behov. Dette legger føringer for nødvendig rekkevidde med batteridrift.</p> <p>Siden revisjonsvogn driver tilsyn og vedlikehold av kontaktledningsanlegg, vil den i de fleste tilfeller kun kjøre der det er elektrifisert. Ved hybrid som gir mulighet for lading på kjørestrekninger, vil energi være tilgjengelig ved behov.</p> <p>Maskinene benyttes av noen til beredskap. Maskinene brukes tidvis 24 timer i døgnet, og hurtig lading av batteriet, uten behov for lange transportetapper, er en forutsetning. Tilgjengelig vekt for batterier kan være en begrensende faktor. Tribrider diesel-batteri-kontaktledning kan også være aktuelle.</p>
<p><b>C</b> Maskiner med høyt energibehov og høyt effektbehov: høyfjellsfres, sporjusterings- og pakkmaskiner, linjelok, pukksuger, m.m.</p>	<p>Det ble ikke vurdert å være sikkerhetsutfordringer med batteridrift av kjøretøyene i kategori C.</p> <p>Med tanke på volum og energibehov kan batterier fungere for kategori C, men sannsynligvis ikke alene. Ettersom energi- og effektbehovet er høyt, vil batteri alene gi utfordringer med batterienes vekt i disse maskinene.</p> <p>Batteriene kan alternativt lades på arbeidsstedet via stasjonære lademuligheter. Etablering av dette er mest aktuelt på anleggsområder som skal brukes over lengre tid. En mobil ladeløsning som tas med eller fraktes inn (f.eks. en powerbank som lades opp på en el-billadestasjon). I Sverige benyttes skinnegående energivogner som kan lades fra landstrøm eller kontaktledning.</p> <p>For mange av disse maskinene er tribrider med kontaktledning og diesel til framdrift og jobbing på høy effekt, med et batteri til jobbing på lav effekt, en aktuell kombinasjon av energibærere.</p>
<p><b>D</b> Annet: Vedlikeholdstoget, brann- og redningstoget, målevogn, snøkostemaskin</p>	<p>I arbeidsverkstedet ble aktuelle temaer ikke drøftet særskilt for maskiner i kategori D.</p>

## Elektrifisering (kontaktledning)

En av de største utfordringene ved bruk av kontaktledning som den primære energibæreren er at mange arbeidsmaskiner som har beredskapsfunksjon, også må kunne fungere dersom kontaktledning av ulike årsaker ikke er tilgjengelig for bruk på de elektrifiserte delene av nettet. I tillegg kommer bruk på ikke-elektrifiserte deler av nettet, inkludert banestrekninger, terminaler og sidespor. Det er heller ikke alltid kontaktledning er spenningssatt ved ulike typer vedlikeholds- eller anleggsarbeid.

Derfor ble det vurdert at elektrisitet fra kontaktledningsanlegg ikke er aktuelt som eneste energikilde for arbeidsmaskiner. Kontaktledning ble derimot vurdert som aktuelt for arbeidsmaskiner som går på elektrifisert bane og i kombinasjon med annen energibærer for fremdrift. Dette gjelder både for elektrifisert og ikke-elektrifisert bane. En del av vurderingene i tabellen under gjelder derfor kontaktledning i kombinasjon med batteri.

For et konsept som forutsetter elektrifisering av hele jernbanenettet, ville energitilførsel vært tilgjengelig over alt, bortsett fra situasjoner hvor kontaktledning er nede eller ikke spenningssatt. Noe av diskusjonen rundt tilgjengelighet faller derfor naturlig bort.

For de konkrete arbeidsmaskinkategoriene er vurderinger som ble gjort på arbeidsverkstedet gjengitt i Tabell 69.

*Tabell 70 Vurdering av elektrisitet som energibærer for arbeidsmaskiner i de ulike arbeidsmaskinkategoriene. Hovedutfordringene som vurderes for de ulike energibærerne er 1) sikkerhet, 2) volum og energibehov og 3) tilgjengelighet på energibærer. For nærmere beskrivelse av hovedutfordringene, se kapittel 12.1.1*

Arbeidsmaskinkategori	Vurdering i arbeidsverksted
<b>A</b> Lastetraktorer	Arbeider i nærheten av spenningssatt kontaktledning er en sikkerhetsrisiko, og derfor benyttes diesel til arbeidskjøring i dag. Av samme grunn kan ikke drift basert på ren kontaktledning ligge til grunn, og hybridkjøretøy med kontaktledning og batteri antas. Mange av svarene vil være de samme som for batterikonseptet, som jo antar del-elektrifisering og lading.
<b>B</b> Revisjonsvogn/ledningsvogn	Kontaktledning er en aktuell energibærer for transport til arbeidsstedet når strekning er spenningssatt. Det er en sikkerhetsrisiko ved arbeid, dvs. utbedring, nymontering av kontaktledning komponenter, inspeksjon osv. under spenningssatt kontaktledning, og da kreves alternativ energibærer i form av eksempelvis batteri.  Kontaktledning som energibærer bør vurderes ved nyanskaffelser, og må inkludere funksjonalitet for jording av strømvtageren.
<b>C</b> Maskiner med høyt energibehov og høyt effektbehov: høyfjellsfres, sporjusterings- og pakkmaskiner, linjelok, pukksuger, m.m.	Sikkerhetsutfordringer med kontaktledning for høyfjellsfres pga. risiko for overslag og at kontaktledningen blir påvirket av snø på en måte som gjør at det blir utfordringer med å bruke den av strømvtageren. Det vil også bygges opp snø og is på strømvtager, og det må være mulig med takrydder for snø på maskinens tak.  Kontaktledning er en aktuell energibærer for transport til arbeidsstedet. For f.eks. pakkmaskiner og ballastfordelere er det mye transport, og de jobber også en god del under spenningssatt kontaktledning. For pukksugere er dette i mindre grad tilfellet, og der har f.eks. Railcare utviklet nye som går på batteri.  For transportlok/linjelok er kontaktledning egnet, gjerne i hybrid/tribridløsning til bruk på anleggsområder. Det finnes

Arbeidsmaskinkategori	Vurdering i arbeidsverksted
	leverandører i Europa som har levert hybride transportlok med diesel-kontaktledning og batteri-kontaktledning.
<b>D</b> Annet: Vedlikeholdstoget, brann- og redningstoget, målevogn, snøkostemaskin	<p>Det er lite sannsynlig at det blir sikkerhetsutfordringer med elektrisk drift av de fleste kjøretøyene i arbeidskjøretøykategori D, men det kan være utfordringer ved driften for flere av kjøretøytypene. I mange tilfeller vil ikke kontaktledning være strømsatt eller funksjonelt ved behov for brann- og redningstog.</p> <p>Når det ikke er mulig å bruke kontaktledning i utførelsen av arbeidet, er det nødvendig med hybrid.</p>

### Temaer på tvers av alle konsepter

I arbeidsverkstedet ble det også drøftet temaer som gjelder alle energibærere, og følgende framkom som funn:

- Det vil være en fordel om alle arbeidsmaskiner på et anleggsområde (skinnegående maskiner, toveismaskiner, osv.) kan benytte samme energibærere.
- Distribusjon av drivstoff/energi til anleggsarbeid eller annet arbeidssted var et tema for alle energibærerne. Siden konkrete løsninger ikke finnes for alle konseptene, er innspillet fra arbeidsgruppa til det videre arbeidet:
  - Bør være felles standarder for overføring.
  - Bør være en eier av energiinfrastrukturen.
  - Må utarbeides gode løsninger til arbeidsmaskiner på anleggsplasser, ikke bare drifts- og vedlikeholdsbaser.
- En bør være forberedt på at godkjenningssprosess for ombygging av eldre kjøretøy til ny energibærer vil bli krevende, kostbart og kan bli en barriere. Dette gjelder spesielt dersom det er mange ulike maskiner med få individer innenfor hver kategori som skal ombygges.
- Det bør legges vekt på å starte med de arbeidsmaskinene som står for den største delen av utslippene, det vil si de det finnes mange av eller som har størst utslipp ved drift.
- Det kan være fordelaktig med et standardisert trekraft-kjøretøy som brukes for disse spesielle arbeidsmaskiner/tog. Gjelder for alle energibærere.

### 13.2.3 RFI i KVV GREEN

I KVV GREEN har det blitt sendt ut en forespørsel om informasjon (RFI) til leverandører av aktuelle arbeidsmaskiner. Det ble stilt spørsmål innenfor flere temaer, og funn fra de ulike temaene beskrives under.

I RFI-en er kjøretøytypene inndelt i tre kategorier med lav effekt, middels effekt og høy effekt. For den minste kategorien finnes det tro på at både batteri og hydrogen kan bli store på markedet. For medium og høy motoreffekt tror nesten alle selskapene på at hydrogen vil bli størst på markedet. Det finnes liten tro på maskiner som er tribrider, med eksempelvis batteri-kontaktledning-Diesel. Generelt forventer leverandørene at diesel vil bli faset ut i perioden 2045-2060.

Det ble også stilt spørsmål om andre løsninger for å redusere CO<sub>2</sub>-utslippene fra arbeidsmaskiner. De som er aktuelle for denne utredningen er oppsummert under.

- Maskinene kan være designet for å kunne gjøre flere jobber samtidig, slik at operasjonstiden på den samme mengde arbeid blir redusert. Dette gir mer jobb med samme tidsforbruk slik at utslippene blir fordelt på mer arbeid.
- Smarte energistyringsystem og smarte maskinløsninger for energioptimalisering.
- Benytte seg av kontaktledningsanlegget der det finnes og er mulig.
- Modulbasert fremdriftssystem, som betyr at det kun blir aktivert den størrelse på fremdriftsutstyret som er nødvendig for oppgaven, slik at unødvendig tomgangskjøring unngås.

## **Energimengde målt som tid og kilometer i drift**

Det er bekreftet at alternativer til diesel vil kunne gi negative konsekvenser for den energimengde som er tilgjengelig før kjøretøyet trenger å enten lade eller tanke. Dette er først og fremst aktuelt for konseptet med batteri, fordi hydrogen kan ha med en relativt stor energimengde som likner det som er mulig med diesel.

Lastetraktorer kan få med batterier på opptil 720 kWh. For en installert mengde på 180 kWh så vil en operasjonstid på 6 timer være mulig. For 180 kWh vil det være mulig med en rekkevidde på mellom 125-225 km i transportmodus. For kjøretøy i kategorien med høyt effektbehov, i dette tilfellet eksemplifisert med skinnefres i RFI-svarene, er batterier vurdert å kunne gi opptil 4 timer i arbeidsmodus. For kun transport vil rekkevidden kunne være 200 km.

## **Kostnader**

For investeringskostnadene så er svarene noe spredt. Kostnaden for en løsning med hydrogen er frem mot 2030 vurdert å utgjøre 130-145 % av kostnaden for diesel. For batteri er kostnaden vurdert til 155-165 % av kostnaden for diesel, og er altså vurdert å være noe høyere enn for hydrogen. Hybrid med diesel-kontaktledning utgjør omtrent 150 %, hybrid batteri-kontaktledning utgjør omtrent 135-140 % og hybrid diesel-batteri utgjør omtrent 125 %. Av de hybride er det altså den med diesel-batteri som er vurdert å ha laveste pris. Merk at kostandene som er omtalt kun omfatter kostnadene for selve kjøretøyene.

Vedlikeholdskostnaden har relativt stor spredning i svarene. Hydrogen varierer mellom 70-130 % i svarene, og for batteri varierer den mellom 105-140 %. Det er uklart om batteribyttekostnaden er inkludert i svaret. For hybrider gir diesel-kontaktledning en reduksjon i vedlikeholdskostnad, og er vurdert til 60-80 % relativt til diesel. batteri-kontaktledning er angitt i spennet 60-105 % med tyngdepunkt mot den lavere delen av spennet. For diesel-batteri svarer de fleste at den vil være omtrent den samme som for diesel, men for noen svarer at den kan være opptil 220 %.

### **13.2.4 Sammenheng av identifiserte tiltak for utslippsreduksjoner fra arbeidsmaskiner og skiftelokomotiver**

Basert på kartleggingen av muligheter for utslippsreduksjoner fra de aktuelle kildene er det funnet flere mulige tiltak med ulik grad av ambisjonsnivå og omfang. Det finnes både tiltak som innebærer skifte av energibærer, og tiltak som kan gjennomføres uavhengig av energibærer.

#### **Tiltak som kan bidra til utslippsreduksjoner uten skifte av energibærer**

Det er identifisert flere tiltak som kan bidra til å redusere CO<sub>2</sub>-utslipp uten et skifte av energibærer. Dette omfatter tiltak av typen optimalisering av vedlikehold, alternative måter å utføre den samme oppgaven på, optimalisering av kjøring og mindre tomgangskjøring, design av maskiner for å kunne gjøre flere jobber samtidig slik at operasjonstiden på den samme mengde arbeid blir redusert, omlegging av driftsmodell for beredskap for å optimalisere bruken av og nødvendig utstyr på maskinene, smarte energistyringssystem og smarte maskinløsninger for energioptimalisering, modulbasert fremdriftssystem osv.

Et sentralt punkt som har framkommet er tilgangen på data knyttet til forbruk av diesel fra arbeidsmaskiner og skiftelok. Etter JDIR sin erfaring finnes per i dag ikke et system for å samle inn data for forbruk av diesel fra ulike eiere/brukere av arbeidsmaskiner. En sentral datafangst, som kan skille på ulike maskintyper og hva de blir benyttet til, vil gi verdifull informasjon om kilder til utslipp, og vil kunne bidra til målrettede og utvalgte tiltak for reduksjon av utslipp. JDIR er kjent med at Bane NOR jobber med forbedring av registrering av dieselforbruk per kjøretøy, og at data fra slikt arbeid vil kunne hentes inn som beslutningsgrunnlag. For andre kjøretøyeiere har ikke JDIR avtaler eller samarbeid som skaffer data over dieselforbruk per maskintype eller arbeidsområde.

Det er også identifisert tiltak av typene kravstilling og incentivordninger. Jernbanesektoren kan stille krav om klimagassutslipp i konkurransegrunnlag, og legge til rette for god vurdering for lave klimagassutslipp i infrastrukturavtaler. I dag synes dette å bli gjort i større grad for veg enn for bane. En utfordring med dette kan være at noen spesialmaskiner benyttes i flere land. En anskaffelse av en slik maskin må dekkes økonomisk via oppdrag fra flere land, og det kan være vanskeligere å stille strenge krav i et internasjonalt marked. Det må forventes at aktørenes interesse og vilje til å levere iht. slike krav bestemmes basert på vurderinger av selskapets eksisterende maskinpark, strategier, bærekraftsmål, konkurrentanalyser og

kriterier i konkurranseutlysningen på infrastruktur. Innføring av incentivordninger kan bidra til å stimulere overgang til teknologi for reduserte klimagassutslipp.

Prinsipielt kan Bane NOR som infrastruktureier stille krav til leverandører av drift- og vedlikeholdstjenester med henblikk på klimagassutslipp. Innenfor bygg- og anleggssektoren er det i dag krav til utslippsfrie byggeplasser i flere kommuner der kommunen er byggherre. Imidlertid kan det i dag være utfordrende å stille krav på en slik måte at det ikke gir negative konsekvenser i form av manglende interesse fra drift- og vedlikeholdsaktørene, eller at det går på bekostning av målsetningen om mer jernbane for pengene. Incentivordninger til eksempelvis nyanskaffelser eller ombygging av maskiner kan være et alternativ, men dette vil kreve at Bane NOR utreder og forvalter en slik ordning, og at det settes av midler til dette.

#### **Tiltak som kan bidra til utslippsreduksjoner med skifte av energibærere**

Svar fra RFI-en indikerer at leverandørene har tro på at både maskiner med batteri og hydrogen som alternative energibærere kan bli store på markedet for arbeidsmaskiner med lav motoreffekt (under 300 kW), herunder kategori A og B. For maskiner med mellomstort og høyt effektbehov (300-600 kW og over 600 kW), kategori C og D, tror nesten alle leverandørene på at hydrogen vil bli størst på markedet. Det finnes liten tro blant leverandørene som har svart på RFI-en på arbeidsmaskiner som er tribrider med f.eks. batteri-kontaktledning-diesel.

I arbeidsverkstedet ble det vurdert at elektrisitet fra kontaktledningsanlegg ikke er hensiktsmessig som eneste energikilde for arbeidsmaskiner. Elektrisitet fra kontaktledning ble derimot vurdert som et aktuelt alternativ for arbeidsmaskiner i kombinasjon med annen energibærer. For hydrogen som energibærer for arbeidsmaskiner ble det generelt diskutert utfordringer knyttet til energieffektivitet og behov for plass til lagring av hydrogen om bord, mulige sikkerhetsutfordringer i driften, system for fylling eller transport av hydrogen til arbeidsstedet med tilhørende investeringskostnader, og eventuelt behov for tilpasninger av verksteder/bygg for å bli sikkerhetsmessig godkjent. For batteri som energibærer for arbeidsmaskiner ble det generelt drøftet behov for ladesystem, herunder både lading i bevegelse med kontaktledning, batteribytte og energivogner. Dersom batteri benyttes i kombinasjon med kontaktledning kan maskinene benytte kontaktledning til lading og transport, og forsynes med energi fra batteri ved arbeid uten spenningssatt kontaktledning.

I arbeidsverkstedet framkom også flere generelle funn og anbefalinger knyttet til valg av energibærere, herunder at det vil være en fordel om alle arbeidsmaskiner på et anleggsområde benytter samme energibærer, at det bør være standarder for overføring av energi, felles eier av energiinfrastrukturen og løsninger for energiforsyning også for anleggsplasser, at godkjenningssprosess for ombygging av eldre kjøretøy til ny energibærer kan være tidkrevende og kostbart og at det kan være fordelaktig med et standardisert trekraft-kjøretøy som brukes for disse spesielle arbeidsmaskiner/tog. Gruppen anbefalte også at det bør legges vekt på å starte med de arbeidsmaskinene som står for den største delen av utslippene. Det vil si de maskinene det finnes mange av, eller som har størst utslipp ved drift.

### **13.3 Teknologisk modenhet og tilgjengelighet i markedet**

Dette kapitlet presenterer teknologisk modenhet og tilgjengelighet i markedet for arbeidsmaskiner og skiftelokomotiv med alternative energibærere i form av hybrid batteri-kontaktledning, hybrid hydrogen-kontaktledning, tribrid batteri-kontaktledning-Diesel, batteri og hydrogen. Kapitlet gjengir i hovedsak resultater fra en kartlegging av teknologisk modenhet og tilgjengelighet i markedet utført av Jernbanedirektoratet beskrevet i «Notat Arbeidsmaskiner og skiftelokomotiver i Alternativanalysen»<sup>37</sup>.

De ulike kategoriene for arbeidskjøretøy og skiftelokomotiv har ulik funksjon, og ulike krav til rekkevidde og effektbehov. Disse vil dermed også ha ulik grad av teknologisk modenhet og tilgjengelighet. Kategori A og B, samt C og D har, delvis sammenfallende energi- og effektbehov, og beskrives under samme deloverskrift i det følgende.

#### **Modenhet og tilgjengelighet for arbeidsmaskiner med alternative energibærere i kategori A og B**

For arbeidsmaskiner i kategori A og B, dvs. lastetraktorer og lednings-/revisjonsvogner, finnes hybride maskiner med batteri-kontaktledning tilgjengelig i markedet med høy teknisk modenhet. Det finnes også

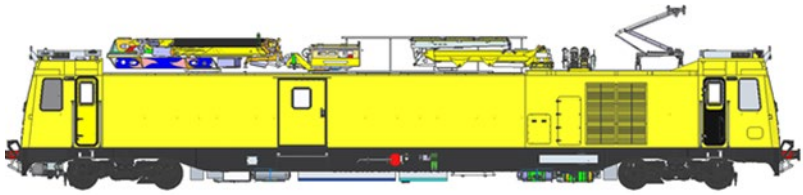
---

<sup>37</sup> Notat om arbeidsmaskiner og skiftelokomotiver i Alternativanalysen, Jernbanedirektoratet, rev. 1, 5.mai 2023.

tribride batteri-kontaktledning-Dieselmaskiner tilgjengelig i markedet. Figur 36 viser eksempel på en tribrid lednings-/ revisjonsvogn.

Hybride hydrogen-kontaktledningmaskiner er vurdert å ha høy teknologisk modenhet. Høy teknologisk modenhet gjelder i dag primært motorvognsett, men teknologien anses å være overførbar til andre typer og kategorier av kjøretøy. Tilgjengeligheten av hybride hydrogen-kontaktledningmaskiner i disse kategoriene er imidlertid lav. Dette synes å være avhengig av etterspørsel, og i hvilken grad maskineiere vurderer at hybride hydrogen-kontaktledningmaskiner er egnet til maskinenes bruksmåte og behov sett opp mot alternative løsninger, og nødvendige investeringer i infrastruktur.

For arbeidsmaskiner som kun benytter henholdsvis batteri eller hydrogen er teknologisk modenhet høy, men tilgjengeligheten i markedet liten. Også her synes dette å være avhengig av etterspørsel, og i hvilken grad maskineiere vurderer energibærerne som egnet til maskinenes bruksmåte sett opp mot alternative løsninger og nødvendige investeringer i infrastruktur. For batterimaskinene er det spesielt aktuelt med vurdering av rekkevidde på maskinene, mens det for hydrogenmaskinene kan knyttes til behovet for utbygging av fyllestasjoner.



Figur 49: Eksempel på tribrid lednings-/revisjonsvogn levert fra Harsco Rail<sup>38</sup>.

### **Modenhet og tilgjengelighet for arbeidsmaskiner med alternative energibærere i kategori C og D**

Det varierer i hvilken grad arbeidsmaskiner i kategori C og D med batterier er tilgjengelige i markedet. Dette er avhengig om maskinene krever høy effekt eller lang rekkevidde, eller begge deler.

For hybrid drift batteri-kontaktledning har kategori D, og spesielt C, høy teknologisk modenhet, men lav tilgjengelighet. Arbeidsmaskiner i disse kategoriene er spesialmaskiner som i hovedsak utfører sporarbeid. Disse skal benyttes på både elektrifiserte og ikke-elektrifiserte strekninger, og har med hybrid batteri-kontaktledning for kort rekkevidde.

Hybride hydrogen-kontaktledningmaskiner er vurdert å ha høy teknologisk modenhet, men lav tilgjengelighet. Høy teknologisk modenhet gjelder i dag primært motorvognsett, men teknologien anses å være overførbar til andre typer og kategorier av kjøretøy. Som for kategori A og B er tilgjengeligheten av hybride hydrogen-kontaktledningmaskiner i disse kategoriene lav. Dette synes å være avhengig av etterspørsel, og i hvilken grad maskineiere vurderer at hybride hydrogen-kontaktledningmaskiner er egnet til maskinenes bruksmåte og behov sett opp mot alternative løsninger, og nødvendige investeringer i infrastruktur.

I starten av 2023 ble det inngått avtale om kjøp av Skandinavias første hybride diesel-kontaktledning sporjusteringsmaskin. Batteridrevet vakuumsuger finnes også på markedet. Dette anses nå som en tilgjengelig standard, og produsenten jobber med å videreutvikle den rene batterimaskinen til å bli hybrid med batteri-kontaktledning. For hydrogen er det utviklet en hydrogendrevet skinnrefresemaskin, som er tilgjengelig i markedet i dag. Dette er ment som erstatning for skinnslipemaskin som benyttes i Norge.

### **Modenhet og tilgjengelighet for skiftelokomotiver med alternative energibærere**

Skiftelokomotiver er teknologisk modne både for batteri, hybrid batteri-kontaktledning og hydrogen (ikke hybrid). Hybride skiftelokomotiver med batteri-kontaktledning finnes tilgjengelig på markedet fra flere leverandører. De hybride skiftelokomotivene har ulik størrelse og ulik størrelse på energilagere, noe som gjør dem egnet til ulike oppgaver, slik som mellomdistansetransport, skifteoperasjoner, banearbeid, kortdistansedrift etc. Hybrid hydrogen-kontaktledning skiftelokomotiver finnes i begrenset utvalg på

<sup>38</sup> Notat om arbeidsmaskiner og skiftelokomotiver i Alternativanalysen, Jernbanedirektoratet, rev. 1, 5.mai 2023.



markedet, men utvalget er størst på batteri-kontaktledning. Hensikten med å være hybrid er at de kan kjøre på linjen og lades ved bruk av strømvaktaker. Det hybride skiftelokomotivet benyttes kun med batteri under arbeid på godsterminalen. Et batteridrevet skiftelokomotiv kan være uten strømvaktaker, altså ikke hybrid. Det vil da lades med lokal ladestasjon via 50HZ nett, og enten via kabel eller en lokal strømvaktaker kun beregnet for lading. Skiftelokomotiv med bare hydrogen finnes tilgjengelig på markedet i et begrenset utvalg.

### Eksempler fra Europa

Det finnes eksempler på andre land som har valgt å satse på hybride løsninger med batterier. I Sveits er det eksempelvis startet et arbeid med å planlegge for ombygging og utskifting av arbeidsmaskiner fra diesel til i hovedsak hybride arbeidsmaskiner basert på batteri-kontaktledning. Valget av batteri-kontaktledning skyldes i stor grad at landet ikke har tilstrekkelig overskuddsenergi til å produsere den nødvendige hydrogengassen. De har likevel vurdert at hydrogen kan være aktuelt for nisjer der rask fylling og høy autonomi er avgjørende. Sveits er et land der hele jernbanen er elektrifisert, og dagens arbeidsmaskiner benytter diesel. Forholdene kan derfor sees som sammenlignbare med de elektrifiserte strekningene i Norge, slik at det kan være mulig å dra nytte av tiltak som er utredet og planlagt. I Østerrike er batteri foretrukket for arbeidsmaskiner på ikke-elektrifiserte baner med lavt energi-/effektbehov, primært lastetraktorer, mens hydrogen er foretrukket for arbeidsmaskiner på ikke-elektrifiserte baner med medium og høyt energi-/effektbehov.

### Svar fra RFI arbeidsmaskiner om forventet teknisk utvikling

Svar fra RFI som er sendt til leverandører av arbeidsmaskiner i forbindelse med denne utredningen viser at leverandørene vurderer at batteri-kontaktledning er anbefalt, på lik linje med hydrogen, for arbeidsmaskiner med lavt energi-/ effektbehov. Innen medium energi-/effektbehov er det best rangering på hydrogen. For maskiner med høyt energi-/effektbehov er det hydrogen som får best rangering, og deretter hybrid batteri-kontaktledning. Ingen leverandører anbefaler kun batteri som løsning. Svarene er gitt av fire ulike leverandører.

### Ombygging av eksisterende maskiner

Løsninger for ombygging av eksisterende maskiner er under utvikling. Av løsninger som kan være overførbare til Norge er det eksempelvis kjent at det utarbeides en prototype på batterivogn som skal levere strøm til lokomotiv T44 som i dag er dielelektrisk, samt at det hos SBB i Sveits er planer om bygge om diesellokomotiv til hybrid batteri-kontaktledning. Løsningene er primært aktuelle for person- og godstrafikk, men det kan være aktuelt å benytte løsningene for å frakte arbeidsmaskiner og komponenter ved hjelp av eldre diesellokomotiver. Figur 49 viser eksempel på løsning med batterivogn.



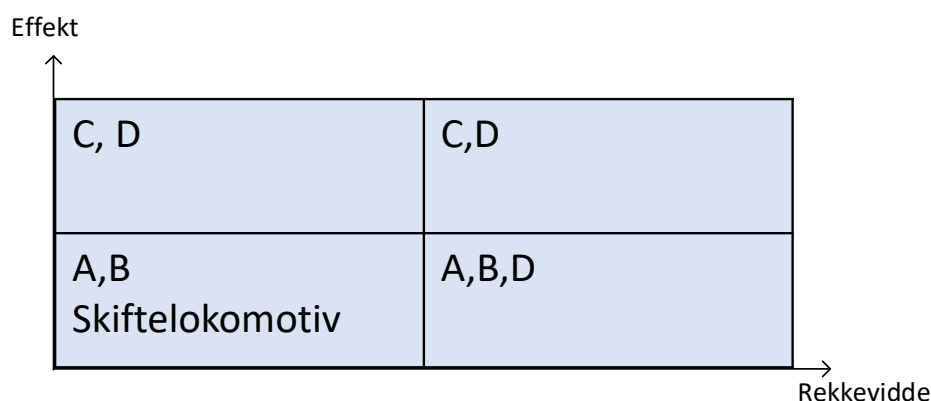
Figur 50: Eksempel på løsning for batterivogn som skal levere strøm til lokomotiv. Kilde: Railcare Group AB.

Bane NOR har også fått tilskudd for å utrede muligheten for ombygging av tre diesel lastetraktorer til hybrid batteri-kontaktledning eller kun batteri. Utredningen er ferdigstilt, og det skal startes et forprosjekt. Kunnskapen om batteriteknologi og ombygging kan få betydning for om nevnte tre lastetraktorer skal bygges om, men kan også bidra til kunnskapsinnhenting, og danne grunnlag for å andre ombygginger på senere tidspunkt.

## Sammendrag teknologisk modenhet og tilgjengelighet i markedet for kjøretøy med alternative energikilder

For kjøretøy i kategori A og B, det vil si lastetraktorer og lednings-/revisjonsvogner, finnes både hybride batteri-kontaktledningmaskiner med høy teknologisk modenhet og tribride maskiner basert på batteri-kontaktledning-Diesel tilgjengelig i markedet. For hybride hydrogen-kontaktledningmaskiner og rene batteri- eller hydrogenmaskiner synes teknologisk modenhet å være høy, mens tilgjengeligheten i markedet er lav, primært som følge av manglende etterspørsel. Når det gjelder arbeidsmaskiner i kategori C og D så er det litt varierende i hvilken grad kjøretøy med alternative energibærere er tilgjengelige i markedet. Det finnes hybrid batteri-kontaktledning sporjusteringsmaskin, batteridrevet vakuumsuger og hydrogendrevet skinnfresemaskin. Skiftelokomotiver er teknologisk modne og tilgjengelige både for batteri, hybrid batteri-kontaktledning og hydrogen (Ikke hybrid).

I tillegg til kategori-inndelingen over, basert på effektbehov, har de ulike arbeidsmaskinene i kategoriene behov for ulik rekkevidde. Kompleksiteten illustreres i Figur 38.



Figur 51 Ulike behov for rekkevidde og effekt innenfor de ulike kategoriene.

Det vil dermed være utfordrende å skulle dekke samtlige behov med kun en energibærer for hver kategori. Eksempelvis har hydrogen brenselceller i dag lav effekt, men drivstofftanker for hydrogen kan gi store volum og dermed lang rekkevidde. Batteridrevne lokomotiv har tilgang på høy effekt, men grunnet lav energitetthet må batterimengden være uforholdsmessig stor for å oppnå samme rekkevidde som hydrogendrevne lokomotiv. Batteridrift gir dermed generelt kortere rekkevidde enn diesel og hydrogen. Ved en eventuell del-elektrifisering vil krav til rekkevidde være mindre utslagsgivende, og modenhetsnivået for ny teknologi være mindre begrensende.

### 13.4 Konsekvenser for arbeidsmaskiner og skiftelokomotiver ved innføring av alternativene for person- og godstog på de ikke-elektrifiserte strekningene

Alternativene for person- og godstrafikk, som omtalt i kapittel 4 til og med kapittel 9, innebærer ulike muligheter og begrensninger for arbeidsmaskiner og skiftelokomotiver. Dette kapitlet vurderer konsekvenser for arbeidsmaskiner og skiftelokomotiver ved innføring av de ulike KVV-alternativene for person- og godstrafikk.

#### 13.4.1 Alternativ 0 Fossil diesel

For dette alternativet vil det ikke være noen endringer i forutsetninger fra dagens situasjon. Dersom dagens situasjon med fossil diesel videreføres for person- og godstog på de ikke-elektrifiserte strekningene, og arbeidsmaskiner skal benytte hydrogen som energibærere, må fyllingsanlegg bygges der arbeidsmaskinene skal operere til bruk kun for arbeidsmaskinene. Dette kan innebære en omfattende investering. Dersom dagens situasjon med fossil diesel videreføres for person- og godstog på de ikke-elektrifiserte strekningene, og arbeidsmaskiner skal benytte batteri som energibærere, må det tilrettelegges for lademuligheter langs de ikke-elektrifiserte strekningene. På strekningene som er elektrifisert, vil arbeidsmaskinene kunne lade mens de kjører, men det må også tilrettelegges for energitilførsel på anlegg, og når det må kjøres eller arbeides over lengre tid uten spenningsatt kontaktledning. Dette vil også medføre et visst

investeringsbehov. Dersom dagens situasjon med fossil diesel videreføres for person- og godstog på de ikke-elektrifiserte strekningene, og arbeidsmaskiner skal benytte elektrisitet via kontaktledning som energibærer, vil dette kun fungere for enkelte situasjoner. På de elektrifiserte strekningene og i situasjoner der arbeidsmaskinen eller lokomotiver kan arbeide under spenningsatt kontaktledning, vil det ikke bli utfordringer. For de ikke-elektrifiserte strekningene og i situasjoner hvor kontaktledningsanlegget ikke er spenningsatt, vil arbeidsmaskinene kreve alternativ energiforsyning.

#### **13.4.2 Alternativ 2a Hydrogen og 2b Hydrogen med del-elektrifisering**

I en situasjon der tog som trafikkerer dagens ikke-elektrifiserte strekninger skal benytte hydrogen, eller eventuelt hydrogen med del-elektrifisering, og arbeidsmaskiner også skal benytte hydrogen, vil det etableres fyllestasjoner som arbeidsmaskinene kan benytte langs dagens ikke-elektrifiserte strekninger. Dersom arbeidsmaskinene skal benyttes på de elektrifiserte strekningene også, må det etableres tankemuligheter spesifikt for arbeidsmaskinene langs de elektrifiserte strekningene.

Dersom arbeidsmaskiner skal benytte batterier vil det måtte tilrettelegges for lading på de ikke-elektrifiserte strekningene. For alternativ 2b Hydrogen med del-elektrifisering, vil det bli mindre behov for ytterligere investeringer i ladeinfrastruktur for kjøring med arbeidsmaskiner. Det må allikevel planlegges for muligheter for lading eller utskifting av batterier på anleggsplasser, og ved arbeid som ikke kan gjøres med spenningsatt kontaktledning.

Dersom arbeidsmaskiner skal benytte elektrisk energi hentet fra kontaktledning og de ikke-elektrifiserte strekningene skal benytte hydrogen eller hydrogen med del-elektrifisering, vil arbeidsmaskinene ikke ha energi på deler av jernbanenettet. I tillegg er det ikke alltid mulig eller trygt for arbeidsmaskiner å benytte kontaktledning under arbeider og enkelte må ha mulighet til å komme fram når kontaktledningsanlegget ikke er spenningsatt, slik at arbeidsmaskinene må ha en supplerende energibærer.

Lastetraktoren skal kunne gå over lange perioder i strekk med effektkrevende utstyr (beredskapsmaskin). Dette fører til et behov for tilgang til eller oppbevaring av større energimengder. Lastetraktoren har begrenset kapasitet til energilagring. Dersom lastetraktorer skal benytte hydrogen vil det derfor være nødvendig med påfylling underveis fra tankbil, eller å benytte energivogner med hydrogen for å kunne dekke energibehovet. Påfylling underveis fra tankbil krever at lastetraktoren forflyttes til en strekning med tilknytning til driftsveg der tanking kan utføres. Dersom det benyttes energivogner med førerhus, vil dagens driftsopplegg i stor grad kunne videreføres. Dersom det stilles krav til at føreren forflytter seg mellom førerhusene ved forflytning av lastetraktoren vil dette gi økt tidsbruk. Alternativ 2a Hydrogen og 2b Hydrogen med del-elektrifisering utelukker ikke andre energibærere for arbeidsmaskiner og skiftelok. En del-elektrifisering, med forutsetninger som angitt i kapittel 7, vurderes ikke å gi spesifikk nytte eller ulempe for arbeidsmaskiner i kategori A. Enkelte lastetraktorer har installert strømvogner, og fremtidige lastetraktorer vil også kunne anskaffes med strømvogner. De vil derfor kunne bruke elektrisk fremdrift på de allerede elektrifiserte banestrekningene til både fremdrift og i arbeid.

Det vil ikke være behov for revisjonsvogner på ikke-elektrifiserte banestrekninger. Dette gjelder for begge hydrogenalternativene.

Arbeidsmaskiner med høyt effekt- og energibehov, slik som høyfjellsfres, sporjusterings- og pakkmaskiner, linjelokomotiv og pukksuger vil få noe ulike konsekvenser ved innføring av alternativ 2a og 2b. Høyfjellsfresere opererer på en avgrenset del av banen, fjellområder på Bergensbanen og Nordlandsbanen, men også ved stort snøfall på andre områder. Disse maskinene skal også kunne arbeide på områder uten kontaktledning. Sporjusterings- og pakkmaskiner, samt pukksuger og andre effekt- og energikrevende arbeidsmaskiner brukes over hele nettet, og valg av hydrogenkonseptet for de ikke-elektrifiserte banestrekningene vil gi mulighet for å bruke kontaktledning på de elektrifiserte banene, og hydrogendrift på de ikke-elektrifiserte banene. Disse maskinene har også behov for å jobbe og kjøres på strekninger/avsnitt uten kontaktledning. Linjelokomotiv brukes over hele nettet til transport av andre vogner med arbeidsutstyr og kjøretøy. Eksempler er trekkraft til brann- og redningstoget, skinnelieferanser, beredskapsoppdrag og andre oppdrag hvor det er behov for trekkraft og hvor arbeidsmaskinene eller vognene ikke har eget utstyr for fremdrift. Disse lokomotivene vil kunne bruke kontaktledning på elektrifiserte banestrekninger, og hydrogen på de ikke-elektrifiserte banestrekningene. På grunn av kravet til beredskap, må lokomotivene kunne kjøres på strekninger og avsnitt uten kontaktledning. I hydrogenkonseptet kan det være nødvendig med påfylling underveis fra tankbil eller å benytte energivogner

med hydrogen for å kunne dekke energibehovet. Påfylling underveis fra tankbil krever at kjøretøyene forflyttes til en strekning med tilknytning til driftsveg der tanking kan utføres. Dersom det benyttes energivogner, kan det bli mulig å videreføre dagens driftsopplegg. Energivogn kan føre til driftsmessige utfordringer med tanke på å skifte retning og sikt, samt at det er usikkerheter knyttet til å kunne bestille spesialtilpassede spesialmaskiner. Utfordringer med energivogn er beskrevet i større detalj i kapittel 8 som omhandler alternativ 3 batteri.

En del-elektrifisering, med forutsetninger som angitt i kapittel 7, vurderes å kunne gi nytte for energikrevende arbeidsmaskiner med lang rekkevidde som i kategori C.

Målevogner kjører en planlagt rute for å måle egenskaper ved infrastrukturen, og må kunne brukes på strekninger og avsnitt uten tilgang til kontaktledningsanlegg. Målevogner vil kunne benytte kontaktledning på de elektrifiserte strekningen, og hydrogen på de ikke-elektrifiserte banestrekningene, på samme måte som person- og godstog. Målevogner har et relativt lavt energibehov. I hydrogenkonseptet kan det være nødvendig med påfylling underveis fra tankbil eller å benytte energivogner med hydrogen for å kunne dekke energibehovet. Påfylling underveis fra tankbil krever at kjøretøyene forflyttes til en strekning med tilknytning til driftsveg der tanking kan utføres. Dersom det benyttes energivogner kan det bli mulig å videreføre dagens driftsopplegg, med noen forbehold, se beskrivelse litt lenger opp.

En del-elektrifisering, med forutsetninger som angitt i kapittel 7, vurderes ikke å gi spesifikk nytte eller ulempe for arbeidsmaskiner i kategori D.

Skiftelokomotiver er bygget for å håndtere oppgaver som å flytte, koble fra eller koble til togvogner innenfor et avgrenset område, for eksempel en driftsbanegård eller godsterminal. Skiftelokomotiv brukes til å bytte plass på vogner for å organisere og danne vognstamme i riktig rekkefølge eller for å flytte vogner/deler av vognstamme til bestemte spor. Dagens skiftelokomotiv er i all hovedsak dieseldrevne, og har et relativt lavt energibehov. De har generelt et begrenset operasjonsområde med planlagte rutiner, og deler på enkelte lokasjoner infrastruktur for drivstoffpåfylling med løfteanordninger etc.

Skiftelokomotiv i hydrogenkonseptet forutsettes å kunne fylle hydrogen enten fra et tankanlegg eller fra en mobil enhet. Skifteoperasjoner og driftsopplegg med et hydrogendrevet skiftelokomotiv vil være som dagens skifteoperasjoner og driftsopplegg med dieseldrevet skiftelokomotiv. Dersom det benyttes energivogner kan det bli mulig å videreføre dagens driftsopplegg, med enkelte forbehold.

Dersom alternativ 2a eller 2b innføres på de ikke-elektrifiserte strekningene utelukker ikke det bruk av batteri for skiftelokomotiver. En del-elektrifisering, med forutsetninger som angitt i kapittel 7, vurderes ikke å påvirke driftsopplegg for skiftelokomotiv.

### **13.4.3 Alternativ 3 Batteri**

Dersom tog som trafikkerer de ikke-elektrifiserte strekningene skal benytte batteri, vil dette ikke være en hindring for bruk av hydrogen til arbeidsmaskiner, men det må i så fall investeres i hydrogenpåfyllingsanlegg over hele jernbanenettet slik at arbeidsmaskinene får nødvendig tilgang til energi. Dette innebærer en betydelig investering.

Ved innføring av alternativ 3 Batteri med del-elektrifisering på de ikke-elektrifiserte strekningene vil det være godt tilrettelagt for at arbeidsmaskiner som benytter batteri. Ved arbeider med høyt energibehov, eller for maskiner som ikke kan benytte kontaktledning av sikkerhetsmessige årsaker, kan det være behov for å lade eller bytte batterier hyppig, og det må tilrettelegges for det. For enkelte operasjoner og arbeidsmaskiner kan energikapasiteten i batterier være for lav, og andre alternativer må undersøkes.

Innføring av batteridrift med del-elektrifisering på de ikke-elektrifiserte banestrekningene innebærer at de ikke-elektrifiserte banestrekningene delvis vil utstyres med kontaktledning som arbeidsmaskiner med strømvogner kan benytte seg av.

Lastetraktorene kan typisk gå i transport i 3 timer i hver omgang, med en kjørelengde tur/retur på opptil 200 km med et gjennomsnitt på 90 km [23].

Lastetraktorene skal kunne gå over lange perioder i strekk med effektkrevende utstyr (beredskapsmaskin). Dette stiller store krav til energimengde ombord. Det kan f.eks. være behov for kontinuerlig arbeid på en ikke-elektrifisert strekning i flere døgn, eller for å støtte med arbeid på en elektrifisert strekning hvor kontaktledningsanlegget er nede. Krav til store energimengder om bord, i kombinasjon med at

lastetraktorenes daglige arbeidsområde kan variere og strekke seg over store avstander, gjør at det er utfordrende å benytte lastetraktorenes kjøremønster som grunnlag for plassering av elektrifiserte strekninger, og for lading av batterier ombord på lastetraktoren. Det er snarere slik at lastetraktorene kan bruke elektrifiseringen som eventuelt finnes for transport over lengere strekninger. Valg av del-elektrifisering, herunder forstått andel elektrifisering og plassering av elektrifiserte delstrekninger, vil derfor gi varierende grad av fordeler for denne kategorien arbeidsmaskiner avhengig av arbeidet som utføres. Del-elektrifiseringen vil bidra til at et batteri tappes mindre under kjøring, særlig for transport av arbeidsmaskinen over lengre strekninger. For å øke fordelene ved elektrifisering for lastetraktorer, kan det sørges for at de steder hvor disse arbeidsmaskinene er stasjonert blir elektrifisert, slik at lastetraktorer med batterier (f.eks. i en batterivogn med stor energimengde) kan lade, men det vil ikke være noen garanti for at batteriene vil inneholde tilstrekkelig energimengde for arbeidet. Hvis det velges et batterikonsept for de ikke-elektrifiserte strekningene for persontog og godstog, vil valg av hydrogen for denne type arbeidsmaskin allikevel være mulig fra et teknisk perspektiv. Det som vil være ulempen med dette er tilgangen på hydrogen. Det vil kreves etablering av muligheter for fylling av hydrogen hensiktsmessig plassert over hele jernbanenettet. Dette vil være en betydelig investering, og det vil kun være arbeidsmaskinene som bruker hydrogen.

En fortsatt bruk av (kun) diesel vil også være mulig, selv om det betyr at arbeidsmaskinene ikke benytter infrastrukturen i de tilfeller der det hadde vært mulig, og slik sett ikke utnytter muligheten for reduserte klimagassutslipp.

Kategori B, som består av revisjonsvogner, vil påvirkes av dette konseptet fordi det medfører etablering av kontaktledningsanlegg. Med valg av et konsept med del-elektrifisering av en eller flere banestrekninger vil revisjonsvognene måtte dekke flere baner, og det kan bli nødvendig å anskaffe flere arbeidsmaskiner av denne typen. Ved transportetapper vil revisjonsvognene kunne bruke kontaktledningsanlegget på del-elektrifiserte strekninger. Noe av bruken av kjøretøyene foregår typisk når kontaktledningsanlegget er ute av funksjon, eller ved kontroller av kontaktledningsanlegget som forutsetter at det er strømløst. Det kan f.eks. være at kontaktledningsanlegget på en del-elektrifisert strekning er i funksjon, og at transporten til den strekningen kan skje med strømvatger dersom det er del-elektrifisert på veien til stedet som skal kontrolleres. Disse arbeidsmaskiner kan typisk gå i transport i 1,5 time i hver omgang, med en kjørelengde tur/retur på opptil 260 km med et gjennomsnitt på 50 km, ref. fotnote **Feil! Bokmerke er ikke definert.**

Også som for kategori A vil valg av hydrogen for arbeidsmaskiner i kategori B være mulig fra et teknisk perspektiv selv om det velges batteri for persontog og godstog. Det betyr at revisjonsvogn ikke blir aktuelt på strekninger uten kontaktledningsanlegg, men det vil kreve etablering av tankemuligheter for hydrogen på de strekningene maskinene skal trafikkere. En fortsatt bruk av (kun) diesel vil også være mulig.

Kategori C, som består av høyfjellsfres, sporjusterings- og pakkmaskiner, linjelok, pukksuger m.m., vil ha forskjellig påvirkning fra konseptet for de ulike typene arbeidsmaskiner. Høyfjellsfresene opererer på en avgrenset del av banene, primært fjellområder på Bergensbanen og Nordlandsbanen, men også på andre banestrekninger ved stort snøfall. Høyfjellsfresene har høyt effektbehov og energibehov, noe som ville gjort det gunstig med tilgang på kontaktledning. Dog er det fare for overslag ved mye snø, som er årsaken til at dagens høyfjellsfresmaskiner på Bergensbanen bruker diesel og ikke kontaktledning. Disse maskinene må også kunne arbeide uten kontaktledning, noe som gjør at de uansett vil ha behov for energilagring ombord.

Sporjusterings- og pakkmaskiner samt pukksuger og andre effekt- og energikrevende arbeidsmaskiner brukes over hele nettet, og et valg av batterikonsept for person- og godstogene for de ikke-elektrifiserte banene vil gi disse arbeidsmaskinene mulighet til å bruke kontaktledningsanlegget på elektrifiserte banestrekninger, noe som er særlig aktuelt for transport til arbeidsted. Disse maskintypene jobber intensivt over korte strekninger i arbeid. Disse strekningene kan være på ikke-elektrifiserte deler av banen, og maskinene har derfor behov for å klare seg uten kontaktledning. Maskinene har stort effekt- og energibehov som gjør at det vil være en utfordring å få med den energimengden det er behov for i arbeidsmaskinen. Kompensasjonstiltak vil være å benytte energivogn (se forbehold beskrevet lenger opp og i kapittel 8) eller å tilrettelegge for hyppige lademuligheter.

Linjelokomotiv brukes over hele nettet til transport av andre vogner med arbeidsutstyr og materiell. Eksempler er trekraft til brann- og redningstoget, skinneliveranser, beredskapsoppdrag og andre oppdrag hvor det er behov for trekraft og hvor arbeidsmaskinene eller vognene ikke har eget utstyr for fremdrift. I kapittel 8 er forutsetningene for et slikt lok med batteriutstyr beskrevet. Linjelokomotivene vil kunne benytte en del-elektrifisering som er basert på person- og godstog, men som følge av kravet til beredskap

så vil det sannsynligvis ikke være en fullstendig løsning med del-elektrifisering for linjelokomotiver. Dette fordi det vil kunne oppstå tilfeller hvor disse arbeider på ikke-elektrifiserte deler av banen over lengere tid. Allikevel finnes det noen tydelige fordeler med del-elektrifisering for denne type «arbeidsmaskin» dersom disse er utstyrt med batterier (som ikke nødvendigvis har stor energimengde). Dette gjelder ved tilfeller med transport inn i tunneler, og hvor arbeidet foregår i tunnelen. Per dags dato må det brukes åndedrettsvern ved leveranser fra slike lokomotiver inn i tunneler. Batteriene kan da lades fra kontaktledningsanlegget, selv om en opplading fra en dieselgenerator ikke er utelukket. Også som for kategori A så vil valg av hydrogen for denne type arbeidsmaskin være mulig fra et teknisk perspektiv selv om det velges batteri for persontog og godstog. Se forklaring under kategori A. En fortsatt bruk av (kun) diesel vil også være mulig.

Målevogner vil kunne benytte del-elektrifisering på lignende måte som person- og godstog. Disse kjører en planlagt strekning for å måle infrastrukturen. Målevognenes relativt lave energibehov, samt type arbeid som utføres, gjør at de er egnet for å bruke del-elektrifisering og batterier for store deler av arbeidet. Maskinene må imidlertid kunne brukes uten tilgang på kontaktledningsanlegget, noe som gjør at det ikke vil være tilstrekkelig med kun batterier for fremdrift. Også som for kategori A så vil valg av hydrogen for denne type arbeidsmaskin være mulig fra et teknisk perspektiv selv om det velges batteri for persontog og godstog. Se forklaring under kategori A. En fortsatt bruk av (kun) diesel vil også være mulig.

En del-elektrifisering for persontog og godstog, med forutsetninger som angitt i kapittel 8, vurderes ikke å påvirke driftsopplegg for skiftelokomotiv. Dette er fordi skiftelokomotivene arbeider innenfor et avgrenset område, for eksempel en driftsbanegård eller godsterminal, som ikke påvirkes av en del-elektrifisering på linjen. For skiftelokomotiv kan det være aktuelt med en ladestasjon på arbeidsområdet for lading i stillstand. Hvis det velges et batterikonsept for banen basert på persontog og godstog, så vil valg av hydrogen for skiftelokomotiv allikevel være mulig fra et teknisk perspektiv. Det som vil være ulempen med dette er at det må etableres fyllestasjoner for hydrogen på de driftsbanegårdene eller godsterminaler hvor skiftelokomotiv brukes. En fortsatt bruk av (kun) diesel vil også være mulig.

#### **13.4.4 Alternativ 4 Elektrifisering**

Alternativ A4 Elektrifisering, dvs. kun helelektriske kjøretøy er ikke et alternativ for hverken arbeidsmaskiner eller skiftelokomotiv. Dersom alternativ 4 Elektrifisering blir innført, må derfor arbeidsmaskiner benytte en annen energikilde enn gods- og persontog, i form av hydrogen eller batteri. Dersom arbeidsmaskinene skulle benyttet hydrogen, måtte det bygges hydrogenfyllestasjoner for arbeidsmaskiner der maskinene skal operere, noe som innebærer en betydelig investering. Ved valg av batteri for arbeidsmaskiner, kunne de ladet batterier langs alle strekninger, men ikke når kontaktledning ikke er spenningsatt, eller det ikke er forsvarlig å benytte kontaktledning. Det må derfor investeres i ytterligere lademuligheter dersom et batterikonsept velges for arbeidsmaskiner ved innføring av alternativ 4 Elektrifisering.

Lastetraktoren skal kunne gå over lange perioder i strekk med effektkrevende utstyr (beredskapsmaskin). Dette stiller store krav til energimengde om bord. Det kan f.eks. være behov for arbeid på en elektrifisert strekning hvor kontaktledningsanlegget er nede. Det betyr at det vil kreves energilagring ombord, og at det energilageret vil være relativt stort. Lastetraktorene vil kunne bruke elektrifiseringen som eventuelt finnes for transport over lengere strekninger. Hvis hele strekningen elektrifiseres vil det være gode muligheter for å bruke batterier dersom kontaktledningsanlegget ikke er tilgjengelig. Men det vil ikke være noen garanti for at batteriene vil inneholde tilstrekkelig energimengde for arbeidet.

Hvis det velges elektrifisering for banen basert på persontog og godstog, så vil valg av hydrogen for denne type arbeidsmaskin allikevel være mulig fra et teknisk perspektiv. Det som vil være ulempen med dette er tilgangen på hydrogen. Det vil kreves en etablering av hydrogenfyllestasjoner over hele jernbanenettet, og det vil kun være arbeidsmaskinene som benytter disse. En fortsatt bruk av (kun) diesel vil også være mulig, selv om det betyr at arbeidsmaskinene ikke benytter infrastrukturen i de tilfeller der det hadde vært mulig, og slik sett ikke utnytter muligheten for reduserte klimagassutslipp.

Kategori B, som består av ledningsvogner, vil påvirkes av dette konseptet fordi det medfører etablering av kontaktledningsanlegg. Med valg av et konsept med elektrifisering av en eller flere banestrekninger vil det være nødvendig å bruke ledningsvogner på disse. Ved transportetapper vil revisjonsvogn kunne bruke kontaktledningsanlegget på elektrifiserte strekninger, forutsatt at ledningsvognene er utstyrt med

strømvogter for å kunne kjøre på banestrøm i tillegg til strømvogter for måling. Selve bruken av kjøretøyene foregår typisk når kontaktledningsanlegget er ute av funksjon, eller ved kontroller av kontaktledningsanlegget som forutsetter at det er strømløst. Det kan f.eks. være at kontaktledningsanlegget på en del av strekningen er i funksjon, og at transporten til den strekningen kan skje med strømvogter dersom anlegget er spenningssatt på deler av strekningen på veien til stedet som skal kontrolleres. Det betyr at det vil være teknisk mulig med batteridrift for arbeidet når anlegget ikke er spenningssatt. Som for kategori A så vil valg av hydrogen for denne type arbeidsmaskin være mulig fra et teknisk perspektiv, selv om det velges batteri for persontog og godstog. Det betyr at ledningsvogner ikke blir aktuelle på strekninger uten kontaktledningsanlegg, men det vil kreve etablering av hydrogen på de strekningene maskinene skal trafikkere. En fortsatt bruk av (kun) diesel vil også være mulig.

Høyfjellsfresene har høyt effektbehov og energibehov, noe som ville gjort kontaktledning til en gunstig energikilde. Grunnet fare for overslag, benyttes ikke kontaktledning for snøfresmaskiner på Bergensbanen i dag. Disse maskinene må også kunne arbeide uten kontaktledning, noe som gjør at de uansett vil ha behov for energilagring ombord.

Sporjusterings- og pakkmaskiner samt pukksuger og andre effekt- og energikrevende arbeidsmaskiner brukes over hele nettet, og et valg av elektrifisering av hele linjen vil gi disse arbeidsmaskinene mulighet til å bruke kontaktledningsanlegget på elektrifiserte banestrekninger. Maskinene har behov for å klare seg uten kontaktledning, noe som gjør at det vil kreves energilagring ombord selv om det elektrifiseres på hele banen.

Linjelokomotivene vil kunne benytte elektrifisering, men som følge av krav til beredskap, så vil det sannsynligvis ikke være en fullstendig løsning med elektrifisering for linjelokomotiver, slik at det er behov for energilagring ombord. Dette fordi det vil kunne oppstå tilfeller der disse arbeider når kontaktledningsanlegget er ute av funksjon, og over lengere tid. Allikevel finnes det noen tydelige fordeler med elektrifisering for denne type maskin dersom disse er utstyrt med batterier. Dette gjelder ved tilfeller med transport inn i tunneler, og hvor arbeidet foregår i tunnelen. Også som for kategori A så vil valg av hydrogen for denne type arbeidsmaskin være mulig fra et teknisk perspektiv selv om det velges å elektrifisere hele banen. Se forklaring under kategori A. En fortsatt bruk av (kun) diesel vil også være mulig.

Målevogner vil kunne benytte elektrifisering på lignende måte som person- og godstog. Disse kjører en planlagt strekning for å måle infrastrukturen. Maskinene må imidlertid kunne brukes uten tilgang på kontaktledningsanlegget, noe som gjør at det ikke vil være tilstrekkelig med kun strømvogter for fremdrift. Målevognerenes relativt lave energibehov, samt type arbeid som utføres, gjør at det vil sannsynligvis være mulig med en løsning med batterier ombord dersom kontaktledningsanlegget er ute av funksjon. Også som for kategori A så vil valg av hydrogen for denne type arbeidsmaskin være mulig fra et teknisk perspektiv selv om det velges elektrifisering av banen. Se forklaring under kategori A. En fortsatt bruk av (kun) diesel vil også være mulig.

For skiftelokomotiver er argumentasjonen den samme som for valg av del-elektrifisering, se forrige kapittel 12.4.3.

### **13.5 Tilfredsstillelse av rammebetingelser**

Rammebetingelsene som ligger til grunn i utredningen bør også tilfredsstilles i tilstrekkelig grad før den enkelte arbeidsmaskin/skiftelokomotiv kan settes i drift med reduserte klimagassutslipp. Det er imidlertid den enkelte eier av arbeidsmaskiner og skiftelok som må ta denne investeringsbeslutningen. Staten kan i en viss grad vurdere om det skal investeres i nødvendig infrastruktur eller ikke.

Det er for omfattende å gjøre vurderinger for den enkelte maskinkategori i denne utredningen. Sentralt i vurdering av tilfredsstillelse opp mot disse rammebetingelsene vil sannsynligvis være; om løsningene er realiserbare i drift, at teknologien er moden nok til at den ikke påvirker person- og godstogavviklingen negativt, at løsningen er driftsstabil, samfunnssikker og at lover og regler kan oppfylles. For arbeidsmaskiner vil det antagelig ikke være like strenge krav til standardisering, kompatibilitet og interoperabilitet som for person-, og godstog. Dette må imidlertid vurderes særskilt for den enkelte anskaffelse av maskiner og lokomotiv, av den enkelte aktør/maskineier.

## 13.6 Tidsperspektiv

Arbeidsmaskiner og skiftelokomotiver eies og driftes av både private og offentlige operatører. Basert på eier-/brukerstruktur, er det mest sannsynlig at ombygging eller skifte av arbeidsmaskiner og skiftelokomotiver vil gjennomføres gradvis etter hvert som det blir behov for utskiftninger av maskinene. Eventuell fremskynding av prosessen kan motiveres ved hjelp av incentivordninger eller krav fra infrastruktureier.

Innen 2034 skal ERTMS være installert på alle banestrekninger. Kjøretøy med kort restlevetid vil ikke få montert utstyr for ERTMS, og de vil da ikke kunne trafikkere strekninger som styres ved hjelp av ERTMS. Dette gjelder også arbeidsmaskiner. For skinnegående arbeidsmaskiner gjelder dette opp mot 50 maskiner inkludert snøfres, og diverse snøryddingsutstyr, som vil bli avhendet eller erstattet frem mot 2034. Det vil være naturlig med en overgang til løsninger for reduserte klimagassutslipp ved utskiftning av kjøretøyene.

Når det gjelder skiftelokomotiver på godsterminaler så er en stor andel av disse av årsmodell 1972-74. Kjøretøyene er med det 40-50 år gamle, og anses å være utskiftningsmodne.

## 13.7 Sammendrag arbeidsmaskiner og skiftelokomotiver

### 13.7.1 Arbeidsmaskiner

Skinnegående arbeidsmaskiner eies av en rekke ulike eiere, og brukes av flere ulike aktører som utfører drift og vedlikehold. Maskinene omfatter flere typer, og benyttes til ulike formål med tilhørende muligheter og begrensninger knyttet til energibærere. Muligheter og begrensninger omfatter blant annet energi- og effektbehov, sikkerhet, teknisk modenhet, tilgjengelighet av tekniske løsninger og tilgjengelighet av energiforsyning. Til sammen utgjør det en kompleks struktur der mulige tiltak for å redusere klimagassutslippene kan variere fra maskintype til maskintype, og innføring av tiltak angår mange aktører.

Skinnegående arbeidsmaskiner med dieseldrift opererer i dag på både de elektrifiserte banestrekningene og de ikke-elektrifiserte banestrekningene. De elektrifiserte banestrekningene har størst trafikk. På disse utføres også størst andel arbeid på jernbanen, og det er funnet at 80 % av utslippene fra skinnegående arbeidsmaskiner kommer fra dieseldrevne maskiner på allerede elektrifiserte banestrekninger [22]. Lastetraktorer og ledningsvogner-/revisjonsvogner som benyttes på elektrifisert bane utgjør hovedandelen av de skinnegående arbeidsmaskinene, og står for en stor andel av utslippene fra denne typen maskiner. Utskifting av disse maskinene til maskiner med teknologi for lavere CO<sub>2</sub>-utslipp er derfor identifisert som en «lavhengende frukt» for å oppnå utslippsreduksjoner fra arbeidsmaskiner. For disse maskinene finnes hybride batteri-kontaktledningkjøretøy med høy teknologisk modenhet tilgjengelig i markedet, som kan utnytte eksisterende kontaktledning som energiforsyning. Det er også vurdert å være høy teknologisk modenhet for rene batterimaskiner, hydrogenmaskiner og hybride hydrogen-kontaktledningmaskiner, men maskiner med disse teknologiene har lavere tilgjengelighet i markedet. Innføring av sistnevnte teknologier for arbeidsmaskiner vil i tillegg innebære etablering av energiforsyning i form av lade- eller tankemuligheter. For lastetraktorer og ledningsvogner som skal benyttes på elektrifiserte baner antas det at hybrid batteri-kontaktledning eller kun batteri, selv med dagens teknologiløsninger, vil være foretrukket som løsning fremfor hydrogen. Dette hensyntar lavest kostnader for investering i infrastruktur (lademulighet), kjøretøy, samt drift og vedlikehold. Det er vurdert at dette er teknologisk modent nå og tilgjengelig i markedet. Strømforsyning fra kontaktledning vil redusere det nødvendige energiforbruket fra batteriet for de mest energikrevende arbeidsoperasjonene. Løsningene vil også forenkle de sikkerhetsmessige tiltak sammenlignet med bruk av hydrogen for maskiner som har varierende arbeidsoppgaver.

For de ikke-elektrifiserte strekningene vil arbeidsmaskinene kunne benytte seg av etablert energiforsyning i henhold til konseptvalg for person- og godstransport dersom det er hensiktsmessig for den enkelte arbeidsmaskin og ønskelig fra kjøretøyeier. Generelt er det ikke funnet at valg av konsept for person- og godstog medfører teknologiske begrensninger for valg av energibærer for arbeidsmaskiner. Ved innføring av eksempelvis alternativ 2A Hydrogen, eller 2B Hydrogen med del-elektrifisering vil det fortsatt være teknisk mulig å benytte arbeidsmaskiner med batteridrift for de kategoriene av maskiner der dette er tilgjengelig. En ulempe vil da være at drift av arbeidsmaskinene krever et system for lading utover hva som er etablert for person- og godstog. Arbeidsmaskinene vil kunne nyttiggjøre seg kontaktledning dersom det finnes, men uten at det er systematisk tilpasset behovene til arbeidsmaskinene. Tilsvarende vil det være behov for å etablere en struktur for fylling av hydrogen på arbeidsmaskiner dersom konsept 3 Batteri



velges for person- og godstrafikk, og arbeidsmaskiner skal drives med hydrogen. Maskinene vil også her kunne benytte seg av kontaktledning dersom det finnes, men uten at det systematisk er tilpasset maskinene og de spesifikke oppgavene som utføres. For nullalternativet med fossil diesel vil det være behov for utbygging av lade-/ tankemuligheter for henholdsvis hydrogen eller batterier som benyttes til arbeidsmaskiner, og ved valg av alternativ 4 Full elektrifisering vil det være behov for etablering av tankemuligheter ved bruk av hydrogen og eventuell supplerende infrastruktur for lading eller skifte av batterier.

Avhengig av den teknologiske utvikling og tilgjengeligheten av utslippsfri teknologi for skinnegående arbeidsmaskiner kan følgende tre trinn være aktuelle:

1. Kategori A (lastetraktorer) og kategori B (revisjonsvogner og ledningsvogner) antas å kunne bli utslippsfrie på dagens elektrifiserte baner. For disse maskinene finnes hybride kontaktledning-Batterikjøretøy med høy teknologisk modenhet tilgjengelig i markedet, som kan utnytte eksisterende kontaktledning som energibærer. Lastetraktorer er arbeidsmaskiner som brukes både på baner med og uten elektrifisering, oppgaven kan være transport av personell og materiell, bruk av løfteinnretninger, snørydding, feilretting, visitasjon osv. og følgelig finnes det flest av denne typen kjøretøy. En annen type kjøretøy som det finnes flere av er ledningsvogner-/revisjonsvogner som kun benyttes på elektrifiserte baner. Til sammen utgjør lastetraktorer og ledningsvogner hovedandelen av de skinnegående arbeidsmaskinene på elektrifiserte baner. Det er mulig å erstatte fossil dieseldrift med hybrid batteri-kontaktledning eller kun batteridrift, og antas kun å kreve enkel DC-lading hvor maskinene er stasjonert. DC-ladingen er tilsvarende de ladestasjoner som planlegges for lastebil på veinettet. Under transport vil arbeidsmaskinene kunne benytte kontaktledning til lading og kjøring, men ved utfall av strømforsyning eller der det ikke er kontaktledning benyttes batteridrift. Sammenlignet med kjøretøy for vei vil derfor stasjonærlading i mindre grad være nødvendig.

Det er også vurdert å være høy teknologisk modenhet for rene batterimaskiner, hydrogenmaskiner og hybride hydrogen-kontaktledningmaskiner, men maskiner med disse teknologiene har lavere tilgjengelighet i markedet.

2. I et tilfelle der de ikke-elektrifiserte banene bygges ut med del- eller hel-elektrifisering, kan kjøretøyanskaffelsene i trinn-1 gjentas med hensyn på teknologivalg. Med dette kan det legges til rette for en ensartet flåte innen arbeidsmaskiner kategori A og B. kontaktledning vil da være tilgjengelig for transportmodus og lading ved kjøring.
3. I perioden frem til 2050 er det sannsynlig at den teknologiske utviklingen for maskiner i kategori C og D gjør det mulig med anskaffelse av nullutslippsteknologi. Nevnte maskintyper har ofte et felles europeisk arbeidsmarked og anskaffes når kundene etterspør utslippsfrie løsninger. I begynnelsen av perioden frem til 2050 vil denne typen maskiner i økende grad bli levert som hybrid diesel-kontaktledning eller tribride diesel-batteri-kontaktledning, noe som vil redusere dieselforbruket på de elektrifiserte banestrekningene. Hydrogen kan være aktuell som energibærer for de maskintypene hvor kravet til energilager er høyt, som for eksempel høyfjellsfreser eller andre spesialmaskiner hvor kontaktledningen ikke kan benyttes eller batterikapasiteten blir for lav.

Hydrogendrift for hovedtyngden av arbeidsmaskiner vurderes å være lite hensiktsmessig der det finnes elektrifisering eller deelektrifisering. Følgelig kan det være hensiktsmessig at kategori A og B arbeidsmaskiner følger energivalg for konsept som velges for person og godstrafikken.

Svakheten med energibærere som batteri og hydrogen er at de krever større andel av kjøretøyets nyttelast eller volum for å utføre samme arbeid sammenlignet med fossil diesel. For hybride batteri-kontaktledning arbeidsmaskiner vil også komponenter være plass- og vektrevende, men i adskillig mindre grad enn helbatteri og hydrogen. Fordelen med batteriteknologi i kombinasjon med deelektrifisering eller elektrifisering er at lading kan skje i fart og at det av denne grunn ikke kreves så mye energi/rekkevidde direkte fra batteripakken. Batteripakken i kategori A og B kan ligge i et område på 500-700 kWh, dvs. en størrelsesorden 7 ganger et personbilbatteri.

Situasjonen for noen av spesialmaskinene i kategori C og D vil være at batteridrift uten tilgang på lading fra kontaktledning eller en hydrogenløsning vil være krevende med hensyn på vekt og/eller volum.

Generelt er det ikke funnet at valg av konsept for person- og godstog medfører teknologiske begrensninger for valg av energibærer for arbeidsmaskiner.

Som følge av eier og brukerstrukturen for arbeidsmaskiner vil det være opp til den enkelte eier/ bruker å beslutte valg av energibærer. Det teknologiske modenhetsnivået og markedstilgangen for lavutslipp-/nullutslippsmaskiner er i støpeskjeen, og etter hvert som dette utvikles, og krav til utslippsreduksjoner forsterkes, forventes det at den enkelte aktør tar egne beslutninger for egne maskininvesteringer, som kan bidra til ytterligere utslippsreduksjoner. Mest sannsynlig vil ombygging eller skifte av arbeidsmaskiner gjennomføres gradvis etter hvert som det blir behov for utskiftninger av maskinene. Spesielt vil maskiner med kort restlevetid, og som ikke får installert utstyr for ERTMS, anskaffes frem mot 2034. Innføring av incentivordninger kan bidra til å stimulere overgang til teknologi for reduserte klimagassutslipp

### **13.7.2 Skiftelokomotiver**

Skiftelokomotivene opererer inne på godsterminalene, og det finnes om lag 17 dedikerte skiftelokomotiver. Lokomotivene er 40-50 år gamle, og anses å være utskiftningsklare. I dag benyttes også dieseldrevne linjelokomotiver som skiftelokomotiver. Skiftelokomotivene eies hovedsakelig av godsoperatøren CargoNet AS (eid av Vy-konsernet). Skiftelokomotiver er teknologisk modne både for lokomotiver drevet av batteri, hybrid batteri-kontaktledning og hydrogen. I prinsippet er valget av energibærer for skiftelokomotivene uavhengig av energibærer på banestrekningene med person- og godstrafikk, men det vil være mulig å utnytte synergieffekter ved eksisterende energiforsyning slik som lading via kontaktledning dersom det finnes kontaktledning tilknyttet godsområdet, bruk av hydrogen dersom det er tilgjengelig fyllstasjon for hydrogen tilknyttet godsterminalen etc. Det anses som rimelig å forvente at skiftelokomotivene byttes ut med hybrid (kontaktledning/50Hz – Batteri) eller (batteri / hydrogen), slik at utslippsreduksjoner kan oppnås frem mot 2030. Innføring av incentivordninger kan bidra til å stimulere overgang til teknologi for reduserte klimagassutslipp, dette kan gjelde statlige godsoperatøren CargoNet eller private godsoperatøren Onrail AS.

### **13.7.3 Tiltak som kan bidra til utslippsreduksjoner uten skifte av energibærer**

Det er identifisert tiltak som kan bidra til å redusere CO<sub>2</sub>-utslipp fra arbeidsmaskiner og skiftelokomotiver uten skifte av energibærer. De mest sentrale er:

- System for innsamling av data knyttet til forbruk av diesel fra arbeidsmaskiner og skiftelok. Etablering av en sentral datafangst, som kan skille på ulike maskintyper og hva de blir benyttet til, vil gi verdifull informasjon om kilder til utslipp, og vil kunne bidra til målrettede og utvalgte tiltak for reduksjon av utslipp.
- Optimalisering av vedlikehold, alternative måter å utføre den samme oppgaven på, optimalisering av kjøring og mindre tomgangskjøring, design av maskiner for å kunne gjøre flere jobber samtidig slik at operasjonstiden på den samme mengde arbeid blir redusert, omlegging av driftsmodell for beredskap for å optimalisere bruken av og nødvendig utstyr på maskinene, smarte energistyringssystem og smarte maskinløsninger for energioptimalisering, modulbasert fremdriftssystem osv. er tiltak som kan bearbeides og bidra til utslippsreduksjoner uavhengig av energibærer.
- Kravstilling og incentivordninger i form av å stille krav om klimagassutslipp i konkurransegrunnlag, og legge til rette for god vurdering for lave klimagassutslipp i infrastrukturavtaler, samt at Bane NOR som infrastruktureier stiller krav til leverandører av drift- og vedlikeholdstjenester med henblikk på klimagassutslipp. Incentivordninger til eksempelvis nyanskaffelser eller ombygging av maskiner kan være et alternativ, men dette vil kreve at Bane NOR utreder og forvalter en slik ordning, og at det settes av midler til dette.

#### **13.7.4 Påvirkning på oppnåelse av effektmål**

Utslippsreduksjoner fra skinnegående arbeidsmaskiner og skiftelokomotiver vil bidra til måloppnåelse for effektmålene 1 (jernbanen skal bidra til at transportsektorens utslipp reduseres med minst 55 % innen 2030), 2 (jernbanen skal bidra til at transportsektorens utslipp reduseres med minst 90-95 % innen 2050) og 3 (mer effektiv bruk av samfunnets samlede energiresurser). For effektmålene 1 og 2 vil utslippsreduksjonene trolig være aktuelle frem mot 2034 ved erstatning av maskiner som ikke får installert ERTMS, og videre frem mot 2050 for øvrige maskiner. For skiftelokomotivene kan utslippsreduksjoner komme allerede frem mot 2030. De totale årlige CO<sub>2</sub>-utlippene fra Bane NOR sine skinnegående arbeidsmaskiner er i størrelsesorden 3600 tonn CO<sub>2</sub>-ekv per år [23]. En utskiftning av til nullutslippsløsninger for maskiner i kategori A og B, dvs. lastetraktorer og ledningsvogner, vil kunne gi et bidrag til utslippsreduksjoner i størrelsesorden 2600 tonn CO<sub>2</sub>-ekv per år dersom alle maskiner i denne kategorien skiftes ut, ref. Tabell. Merk at dette kun er anslag basert på Bane NOR sine tall, og at utslippsreduksjoner fra maskiner fra andre eiere tilkommer utover dette. Etter hvert som det teknologiske modenhetsnivået øker, markedstilgangen for lavutslipp-/nullutslippsmaskiner blir høyere, og krav til utslippsreduksjoner forsterkes, vil den enkelte aktør ta egne beslutninger for egne maskininvesteringer, som kan bidra til ytterligere utslippsreduksjoner. For effektmål 4 (ivareta togtilbudets attraktivitet) tolkes arbeidsmaskinenes og skiftelokomotivenes betydning å være i hvilken grad de er i stand til å opprettholde forutsetningene for fremføring av person- og godstransport som kreves for at person- og godstransport skal ivareta sin attraktivitet. Det er vurdert at tiltak for utslippsreduksjoner fra arbeidsmaskiner og skiftelokomotiver som iverksettes vil oppfylle dette i tilstrekkelig grad, slik at måloppnåelse for togtilbudets attraktivitet forblir uendret.

# **14 Vedlegg**

**14.1 Underlagsrapport grunnkalkyle (UNNTATT OFFENTLIGHET)**

**14.2 Notat om forutsetninger for analyse av alternativer**

**14.3 Usikkerhetsanalyse (UNNTATT OFFENLIGHET)**

**14.4 Energisimulering**

**14.5 Samfunnsøkonomisk analyse**

**14.6 Jernbanedirektoratets referansealternativ**

**14.7 Standard togtyper i referansealternativet**

**14.8 Underlagsnotat om infrastrukturforutsetninger i KVU GREEN**

**14.9 Arealbeslag og kostnader for hydrogendepoter**

# 15 Kilder og referanser

- [1] Bane NOR, «Generelle tekniske krav - Overbygningsklasser,» [Internett]. Available: [https://trv.banenor.no/wiki/Overbygning/Prosjektering/Generelle\\_tekniske\\_krav#Overbygningsklasser](https://trv.banenor.no/wiki/Overbygning/Prosjektering/Generelle_tekniske_krav#Overbygningsklasser) . [Funnet 2023-03].
- [2] Miljødirektoratet, «Biodrivstoff,» [Internett]. Available: <https://www.miljodirektoratet.no/ansvarsomrader/klima/transport/biodrivstoff/>. [Funnet 03 2023].
- [3] Bane NOR, «Network Statement - Påfyllingsanlegg for drivstoff,» [Internett]. Available: <https://networkstatement.banenor.no/doku.php?id=vedlegg:dieselanlegg>. [Funnet 03 2023].
- [4] Oljedirektoratet, «Ressursrapport 2022 - kapittel 2 - Gjenværende petroleumsressurser,» [Internett]. Available: <https://www.npd.no/fakta/publikasjoner/rapporter/ressursrapporter/ressursrapport-2022/2-gjenvarende-petroleumsressurser/>. [Funnet 03 2023].
- [5] CircleK, «milesBIO HVO100 - fornybar diesel med miles additiv,» [Internett]. Available: <https://www.circlek.no/bedrift/drivstoff/milesbio%C2%AE-hvo100>. [Funnet 03 2023].
- [6] Esso Energi, «HVO 100 Diesel - Palmefritt,» [Internett]. Available: <https://essoenergi.no/drivstoff/hvo-100-diesel>. [Funnet 03 2023].
- [7] Biofuel Express, «HVO100 Renewable diesel - Fossilfritt operasjon uten kompromisse,» [Internett]. Available: <https://www.biofuel-express.com/no/hvo100/>. [Funnet 03 2023].
- [8] DRIVenergi, «Produkter og priser,» [Internett]. Available: <https://drivenergi.no/bedrift/produkter-og-priser/>. [Funnet 03 2023].
- [9] Midt-Norsk Olje AS, «HVO 100,» [Internett]. Available: <https://midtnorskolje.no/produkt/drivstoff-og-fyringsolje/hvo-100/>. [Funnet 03 2023].
- [10] Statistisk sentralbyrå (SSB), «Sal av petroleumsprodukt og flytande biodrivstoff,» [Internett]. Available: <https://www.ssb.no/energi-og-industri/olje-og-gass/statistikk/sal-av-petroleumsprodukt>. [Funnet 03 2023].
- [11] Miljødirektoratet, «System for flytende biodrivstoff utover omsetningskrav,» Miljødirektoratet, 2023. ]
- [12] Regjeringen i Norge, «NTP 2025-2036 - Vedlegg Klima og Miljø,» Regjeringen, 2023. ]
- [13] Statistisk sentralbyrå, Bruttoforbruk av elektrisk kraft 12824-04, 2022. ]
- [14] Bane NOR, «NULLFIB2 - Delrapport 2 - Banestrømforsyning for batteridrift på jernbanen,» Jernbanedirektoratet, 2021. ]
- [15] Jernbanedirektoratet, «NULLFIB2 - Batteriteknologi for jernbanekjøretøy,» 2021. ]
- [16] Wabtec, «Rio Tinto Orders Wabtec FLXdrive Battery Locomotives to Reduce Emissions,» [Internett]. Available: <https://www.wabteccorp.com/newsroom/press-releases/rio-tinto-orders-wabtec-flxdrive-battery-locomotives-to-reduce-emissions>. [Funnet 15 06 2023].

- [17 Norske tog, «Stadler skal levere Norges nye fjerntog,» [Internett]. Available:  
] <https://www.norsketog.no/nyheter/2023/stadler-skal-levere-norges-nye-fjerntog>. [Funnet 15 06  
2023].
- [18 J. Seehusen, «Her er de tre turbintypene du finner i vannkraftverk i dag,» Teknisk Ukeblad Media AS,  
] [Internett]. Available: [https://www.tu.no/artikler/her-er-de-tre-turbintypene-du-finner-i-vannkraftverk-i-  
dag/499547](https://www.tu.no/artikler/her-er-de-tre-turbintypene-du-finner-i-vannkraftverk-i-dag/499547). [Funnet 15 06 2023].
- [19 Statistisk sentralbyrå (SSB), «Elektrisitet,» [Internett]. Available: [https://www.ssb.no/energi-og-  
industri/energi/statistikk/elektrisitet](https://www.ssb.no/energi-og-industri/energi/statistikk/elektrisitet). [Funnet 03 2023].
- [20 P. B. W. Rosendal K. E., «Karbonprisbaner til bruk i nyttekostnadsanalyser i Norge,» Fagforeningen  
] Samfunnsøkonomene, Oslo, 2023.
- [21 Statistisk Sentralbyrå, «Salg av petroleumsprodukter, tabell 4,» 2022.  
]
- [22 Jernbanedirektoratet, «CO2 utslippreduksjoner fra skinnegående arbeidsmaskiner,» 23.06.2022.  
]
- [23 Bane NOR, «Mulighetsstudie for å oppnå utslippsreduksjon fra arbeidsmaskiner i periodene frem til  
] 2030 og 2050,» 25.03.2022.
- [24 Jernbanedirektoratet, «NULLFIB2 - Nullutslipp - batteridrift på jernbanen - Hovedrapport,»  
] Jernbanedirektoratet, 2021.
- [25 Bane NOR, «Teknisk regelverk -,» [Internett]. Available:  
] [https://trv.banenor.no/wiki/Overbygning/Prosjektering/Generelle\\_tekniske\\_krav](https://trv.banenor.no/wiki/Overbygning/Prosjektering/Generelle_tekniske_krav).
- [26 Jernbanedirektoratet, «NULLFIB - Delrapport 3 - Del-elektrifisering / Infrastrukturiltak,» 2019.  
]
- [27 Jernbanedirektoratet, «NULLFIB - Sluttrapport,» Jernbanedirektoratet, 2019.  
]
- [28 A. Melgaard og P. Foshaugen, «Kontaktledningsanlegg i eksisterende tunneler,» NTNU, 2016.  
]
- [29 Jernbaneverket, «Kontaktledningsanlegg Kontaktledningssystem Dobbel kontakttråd Generell  
] beskrivelse for prosjektering og bygging,» Jernbaneverket, 2007.
- [30 NSB, «25 kV, 50 Hz matesystem ved NSB. Videre utredning,» NSB, 1995.  
]

# 16 Rettinger og hendelser etter at rapporten kom 18.september 2023

Del	Kapittel	Side	Feil	Korreksjon	Korrigert dato
Samfunnsøkonomisk analyse rapport (vedlegg 6-1)	Sammendrag	2-7	Kostnad pr tonn CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> kostnad i teller fjernet. Gir betydelige endringer i alle konsept.	28.09.2023
Samfunnsøkonomisk analyse rapport (vedlegg 6-1)	Kapittel 4	27-38	Kostnad pr tonn CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> kostnad i teller fjernet. Gir betydelige endringer i alle konsept.	28.09.2023
Samfunnsøkonomisk analyse rapport (vedlegg 6-1)	Kapittel 4	27-38	Netto nåverdi	Mindre ubetydelige endringer pga. noen utelatte utslipp i byggefase	03.10.2023
Samfunnsøkonomisk analyse rapport (vedlegg 6-1)	Vedlegg 4	73-74		Forklaring av endringer	28.09.2023
Alternativanalyse (vedlegg 6)	10.1- 10.4 Samfunnsøkonomisk analyse	141-147	Kostnad pr tonn CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> kostnad i teller fjernet. Gir betydelige endringer for alle konsept	28.09.2023
Alternativanalyse. (vedlegg 6)	10.1-10.4 Samfunnsøkonomisk analyse	141-147	Netto nåverdi	Mindre ubetydelige endringer pga. noen utelatte utslipp i byggefase	03.10.2023