



Jernbane-  
direktoratet

# Klimagassutslipp

Livssyklusanalyse på endring i klimagassutslipp  
fra konseptalternativer i KVV Green

Dokument nr: 202300894-8

Dato: 05.07.23

# Sammendrag

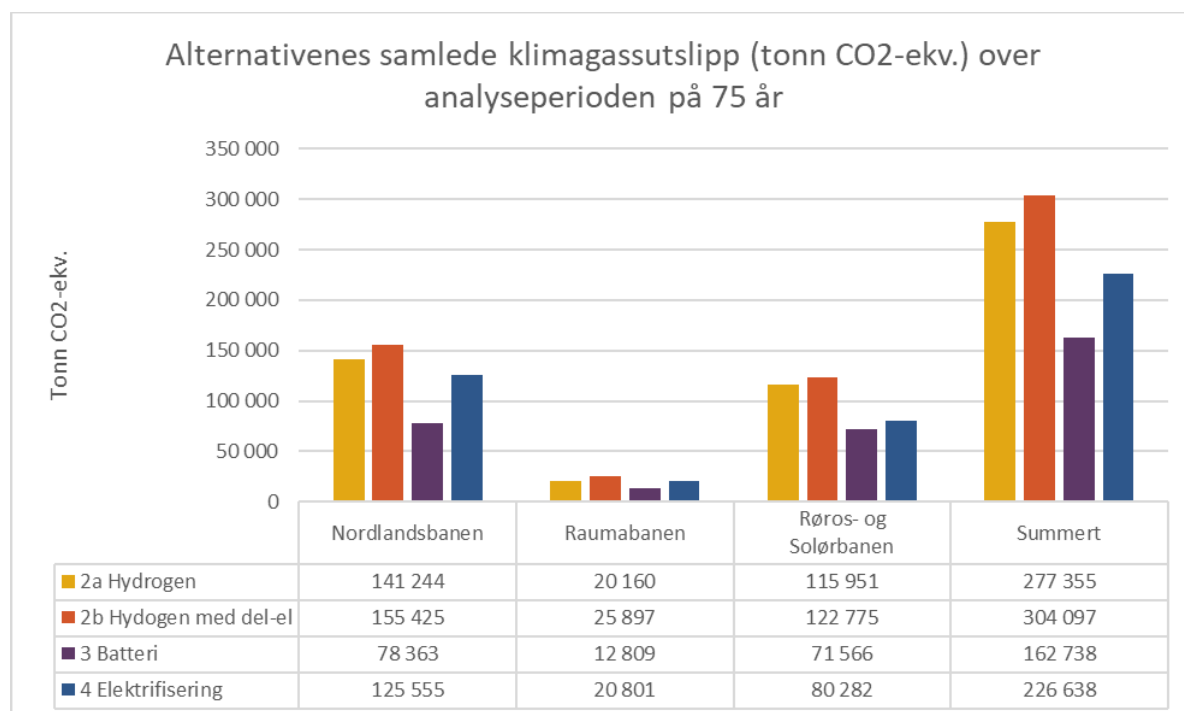
Livsløpsanalyser (LCA) er en systematisk analyse for å evaluere miljømessige konsekvenser knyttet til et produkt, et produktsystem eller en aktivitet. I dette vedlegges presenteres analyser av klimagasskonsekvensene av de ulike alternativene som vurderes i KVV Green. Analysen inkluderer hele livssyklusen fra uttak av råmaterialer, produksjon, distribusjon, bruk, gjenbruk og vedlikehold. Resirkulering og endelig kassering er ikke inkludert. Analysen skiller mellom kvotepliktig og ikke-kvotepliktig sektor, og mellom direkte og indirekte utslipp. Formålet har vært å bl.a. å isolere effekten på det norske utslippsregnskapet, og at klimagevinstene ved overgangen til ny energibærer på jernbanen ikke overskygges av utslipp tilknyttet investeringer, drift og vedlikehold.

Det har vært krevende å oppdrive gode satser for klimagassutslipp fra en del av tiltakene som inngår i KVV Green, bl.a. som følge av at mange av tiltakene innebærer ombygging av eksisterende infrastruktur (i motsetning til ny utbygging) eller bruk av relativt ny teknologi det finnes liten erfaring med å få analyser av. De primære kildene er jernbanesektorens tidligfaseverktøy for klimagassutslipp (LCA-verktøy for tidligfasevurderinger), samt erfaringstall fra det pågående elektrifiseringsprosjektet på Trønder- og Meråkerbanen.

I sum bør usikkerheten i beregningene av utslipp fra bygging og vedlikehold anses som stor.

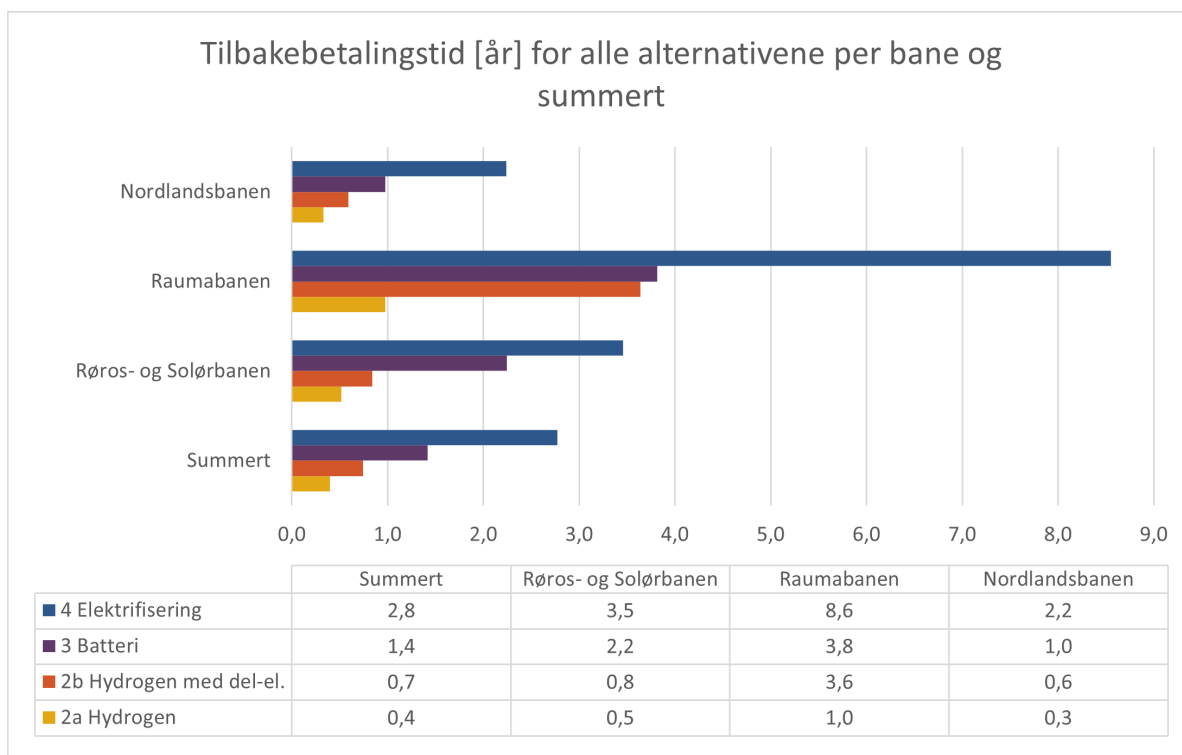
Til tross for at usikkerheten er stor, er det imidlertid tydelig at alle konseptene som er utredet i alternativanalysen i KVV Green vil bidra til netto reduksjon av klimagassutslipp. Dette skyldes at utslipp fra diesel som energibærer for trafikken i referansealternativet er betydelig større enn utslippene 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 ca. 3 år eller mindre fra idriftsettelse (med unntak av Raumabanen). Det innebærer at utslippene fra utbygging og vedlikehold må være minst 30 ganger større enn beregningene viser, for at konseptene ikke skal medføre en netto reduksjon i klimagassutslipp over beregningsperioden på 75 år. Dette vurderes som svært usannsynlig.

Figuren under viser alternativenes samlede klimagassutslipp over analyseperioden på 75 år. Fordi konsept 0 er referansealternativet så vises det som «null». Alternativ 3 batteri har lavest klimagassutslipp, og dette skyldes hovedsakelig at dette alternativet har lavere utslipp fra drift per år enn alternativ 2a/b, og lavere utslipp fra anleggsfasen enn alternativ 4.



Figur 1 Samlede klimagassutslipp for hver alternativ og bane.

Hydrogenalternativet 2a har den korteste tilbakebetalingstiden for hver bane som vist i figuren under og har dermed også den korteste tilbakebetalingstiden totalt for alle baner summert (vektet snitt). Hydrogen med del-elektrifisering (2b) har på totalen nesten samme tilbakebetalingstid, tett fulgt av batterikonseptet (3). Batterikonseptet har lavere utslipp per år i drift, noe som medfører at forskjellen mellom alternativ 2a/b og alternativ 3 blir mindre over lengre tid. Den lange analyseperioden gjør at det lavere utslippet i drift fra alternativ 3 blir lavest på hele analyseperioden for alle baner. Alternativ 4 skårer lavest i tilbakebetalingstid, men har lavere utslipp enn alternativ 2a/b over analyseperioden.



Figur 2 Tilbakebetalingstid for alle alternativ og baner

Som figuren viser, er tilbakebetalingstiden summert for alle de tre banene, litt lengre enn for Nordlandsbanen alene, og kortere enn for de to andre banene. Den summerte størrelsen er mest aktuell å benytte dersom man vurderer å innføre én og samme energibærer på alle tre baner.

<b>Utarbeidet av:</b> Jernbanedirektoratet i samarbeid med WSP	<b>Saks nr:</b> 202300894
<b>Godkjent av:</b> Jernbanedirektoratet	<b>Dokumentnummer:</b> 202200549-8
<b>Dato</b> 05.07.2023	<b>Versjon</b> 02
<b>Endringslogg</b>	<b>Kommentar</b>
Versjon 1	

# Innhold

<b>1</b>	<b>Metode</b>	<b>5</b>
1.1	Livssyklusanalyser av jernbaneinfrastruktur	5
1.2	Direkte og indirekte utslipp ved verdsetting i samfunnsøkonomiske analyser	5
1.3	Utslipp fra energiproduksjon til togfremføring	6
<b>2</b>	<b>Oversikt over konseptene</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Satser benyttet i beregningen</b>	<b>8</b>
3.1	Nærmere forklaring av satsene	9
3.1.1	Tunneler	9
3.1.2	Overgangsbruer	10
3.1.3	Ny jernbanebru	10
3.1.4	Kontaktledningsanlegg og omformerstasjon	10
3.1.5	Hydrogendepot	10
3.1.6	Nye jernbanespor og veier	11
3.1.7	Vedlikehold av kontaktledningsanlegg	11
3.1.8	Batterier	11
3.1.9	Hydrogenutstyr ombord kjøretøy	11
3.1.10	Vedlikehold av spor	12
3.2	Oversikt over bruk av satser	13
<b>4</b>	<b>Resultater</b>	<b>14</b>
4.1	Referansealternativet (0 Fossil diesel)	14
4.2	Hydrogen (2a)	14
4.2.1	Klimagassutslipp forbundet med utbygging av alternativet	14
4.2.2	Klimagassutslipp forbundet med drift av alternativet over analyseperioden	15
4.2.3	Oppsummering av resultater fra anleggs- og driftsfase	16
4.2.4	Tilbakebetalingstid	16
4.3	Hydrogen med del-elektrifisering (2b)	17
4.3.1	Klimagassutslipp forbundet med utbygging av alternativet	17
4.3.2	Klimagassutslipp forbundet med drift av alternativet over analyseperioden	18
4.3.3	Oppsummering av resultater fra anleggs- og driftsfase	18
4.3.4	Tilbakebetalingstid	19
4.4	Batteri (3)	20
4.4.1	Klimagassutslipp forbundet med utbygging av alternativet	20
4.4.2	Klimagassutslipp forbundet med drift av alternativet over analyseperioden	20
4.4.3	Oppsummering av resultater fra anleggs- og driftsfase	21
4.4.4	Tilbakebetalingstid	21
4.5	Elektrifisering (4)	22
4.5.1	Klimagassutslipp forbundet med utbygging av alternativet	22
4.5.2	Klimagassutslipp forbundet med drift av alternativet over analyseperioden	23
4.5.3	Oppsummering av resultater fra anleggs- og driftsfase	23
4.5.4	Tilbakebetalingstid	24
4.6	Samlede resultater	25
<b>5</b>	<b>Usikkerhet og konklusjon</b>	<b>27</b>
5.1	Usikkerhet i beregning av utslipp fra byggefase	27
5.2	Usikkerhet i beregning av utslipp fra vedlikehold i driftsfase	27
5.2.1	Særlig usikkerhet rundt klimakonsekvensene ved hydrogenlekkasjer	28
5.3	Konklusjon vedrørende klimakonsekvensene av de utredede konseptene	28
<b>6</b>	<b>Referanser</b>	<b>29</b>

# 1 Metode

## 1.1 Livssyklusanalyser av jernbaneinfrastruktur

Livsløpsanalyser (LCA) er en systematisk analyse for å evaluere miljømessige konsekvenser knyttet til et produkt, et produktsystem eller en aktivitet. Analysen inkluderer hele livssyklusen fra uttak av råmaterialer, produksjon, distribusjon, bruk, gjenbruk, vedlikehold, resirkulering – til endelig kassering; inkludert all transport involvert<sup>1</sup>. Formålet med livsløpsanalyser er å gi informasjon om totalt fotavtrykk til en vare, tjeneste eller aktivitet, samt muliggjøre en velbegrunnet avgjørelse om alternativ som totalt sett reduserer fotavtrykket tilknyttet varen, tjenesten eller aktiviteten.

Klimagassutslippene fra en livsløpsanalyse vil inkludere både kvotepliktige og ikke-kvotepliktige utslipp i henhold til EUs klimaregime og kvotehandelssystem. Kvotepliktige utslipp omfatter sektorene landbasert industri, offshoreanlegg og luftfarten. I praksis innebærer dette at de fleste bransjer som produserer varer og byggematerialer inngår som kvotepliktig sektor. Disse må derfor kjøpe utslippskvoter om de overskrider utslipp utover de tildelte kvotene.

Ikke-kvotepliktig sektor omfatter bransjer som ikke inngår i EUs kvotehandelssystem. Dette er primært utslipp fra transport, landbruk, havbruk, avfall og noe industri som bygg og anlegg. Klimagassutslipp fra transportsektoren (ref. effektmålet) bokføres i all hovedsak som ikke-kvotepliktige utslipp, men en rammebetingelse satt for denne KVUen er at konseptene ikke skal medføre totalt sett en økning i globale utslipp. En sammenstilling av klimagassutslippene som konseptene medfører over livsløpet er derfor nødvendig både for å vurdere effektmåloppnåelse og påvirkningen på globale utslipp. Figur 1 viser systemdiagrammet for jernbaneinfrastruktur over livsløpet i et «krybbe til grav»-perspektiv. Det er i denne analysen ikke inkludert «Slutfase C1-C4». Årsaken til det er at denne inntreffer etter selve analyseperioden på 75 år, og vil mest sannsynlig inngå i utslippsberegninger for utbygging av ny infrastruktur som erstatter den eksisterende.

Oppstrøms			Kjerneprosess		Nedstrøms				
Produksjonsfase			Byggefase		Bruksfase			Slutfase	
Råmaterialer	Transport til produksjon	Produksjon	Transport til/på anlegg	Bygge	Konstruksjon i bruk	Vedlikehold og opp- og gradering	Drift	Nedbygning og re-sirkulering	Transport
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2-B5	B6-B7	C1-C4	

Figur 3: Systemdiagram for jernbaneinfrastruktur over livsløpet.

## 1.2 Direkte og indirekte utslipp ved verdsetting i samfunnsøkonomiske analyser

Foruten skillet mellom kvotepliktige og ikke-kvotepliktige utslipp, skilles det også mellom direkte og indirekte utslipp. En grov kategorisering er at indirekte utslipp i stort bokføres som kvotepliktige utslipp, mens direkte utslipp bokføres som ikke-kvotepliktige utslipp. Det presiseres imidlertid at dette er en forenkling hvor unntak forekommer, avhengig av hva som analyseres. For et utbyggingsprosjekt i transportsektoren benyttes følgende sortering (Menon, 2022) (se tabell 1).

<sup>1</sup> [livsløpsanalyse – Store norske leksikon \(snl.no\)](https://snl.no/livsløpsanalyse)

Tabell 1: Oversikt og fordeling av klimagassutslipp fra utbyggingsprosjekt i transportsektoren

		Omfattet CO <sub>2</sub> -avgift	Omfattet ETS?	Ikke avgift eller ETS <sup>2</sup>
<b>Direkte utslipp</b>	<i>Dieselforbruk i maskiner og annet utstyr</i>	✓		
	<i>Dieselforbruk i lastebiler til massetransport</i>	✓		
	<i>Utslipp fra sprengning</i>			✓
	<i>Utslipp fra arealbruksendring</i>			✓
<b>Indirekte utslipp</b>	<i>Materialproduksjon</i>	✓	✓	✓
	<i>Materialtransport</i>	✓		
	<i>Produksjon av energibærer (utvinning, raffinering og transport av energi)</i>		✓	✓
	<i>Produksjon og vedlikehold av maskiner og utstyr</i>		✓	✓

For å unngå dobbelttelling i de samfunnsøkonomiske analysene, må den eksterne kostnaden telles bare én gang (jf. også DFØs veileder i samfunnsøkonomiske analyser). Det vil si at den eksterne virkningen kan prissettes basert på enten kalkulasjonspriser eller avgifter/kvotepriker som skal korrigere for eksternaliteten. Det betyr at det er de direkte utslippene fra byggefase og bruksfase (kodene A4 – B7) som verdsettes i de samfunnsøkonomiske analysene etter Finansdepartementets karbonprisbaner. For indirekte utslipp er det forutsatt at disse er internalisert gjennom prisen på innsatsvarer via kvotepris eller avgift, og dette inngår som en del av investeringskostnadene i den samfunnsøkonomiske analysen. Indirekte utslipp skal imidlertid synliggjøres og beskrives.

### 1.3 Utslipp fra energiproduksjon til togfremføring

Det er forutsatt at strømmen som brukes til å kjøre togtilbudet ikke medfører utslipp. Dvs. produksjon av strøm og hydrogen uten klimagassutslipp. Alternativ bruk av strømmen som togtilbudet benytter (direkte via kontaktledning eller indirekte via hydrogenproduksjon), og om denne strømmen kunne gi større reduksjoner i klimagassutslipp ved å bli benyttet i andre sektorer, er ikke vurdert eller hensyntatt i klimaberegningene. Det er imidlertid gjennomført vurderinger av knappe energiresurser som del av vurderingen av effektmål 3. Se rapport for Alternativanalysen for nærmere omtale av dette.

<sup>2</sup> European Union Emissions Trading System (i.e kvotehandelssystemet)

## 2 Oversikt over konseptene

**0** Fossil diesel



**2<sub>a</sub>** Hydrogen



**3** Batteri



**4** Elektrifisering



**2<sub>b</sub>** Hydrogen med del-elektrifisering



Figur 4: Oversikt over konsepter til beregning.

Det skal beregnes indirekte og direkte utslipp over livsløpet (A1-B7) for fire konsepter og ett del-konsept (2b) for hver ikke-elektrifisert strekning i referansealternativet. Konsept 1a og 1b (ikke-fossil diesel) er silt ut som følge av ingen eller negativ effektmåloppnåelse. Dette forklares i kapittel 4.9 og 4.11 i Alternativanalysen i KVVU GREEN. Konsept 1a og 1b er derfor ikke inkludert for livsløpsanalyse av klimagasser. De direkte utslippene skal skilles ut og inngå som prissatt virkning i de samfunnsøkonomiske analysene for både utbyggingsfase og bruksfase. Det henvises til Alternativanalysen i KVVU GREEN for nærmere omtale av forutsetninger og forbehold knyttet til valg av teknisk løsning, mengder infrastruktur og kjøretøy som forutsettes, mv.

### 3 Satser benyttet i beregningen

I tabellen nedenfor er det presentert en oversikt over hvilke satser som er lagt til grunn for beregningen. I tillegg er det anvendt en del forutsetninger som er særskilte for de ulike alternativene. Disse er beskrevet nærmere i omtalen av hvert alternativ i kapittel 4 og dreier seg i all hovedsak om størrelser og mengder som satsene er benyttet på.

I oversikten i tabellen er det også angitt en kolonne som viser hvor satsene er hentet fra, eventuelt hvilke aggregeringer og forenklinger som er lagt til grunn. Der «Tidligfaseverktøy v.6» er nevnt, viser dette til jernbanesektorens eget LCA-verktøy som baseres på erfaringstall fra utbygging og planlegg av jernbaneprosjekter. Verktøyet er også harmonisert mot andre transportetaters LCA-verktøy, og er i så måte å anse som troverdige.

En annen viktig kilde som benyttes i beregningene er erfaringstall fra elektrifisering av Trønder- og Meråkerbanen.

Det har vært krevende å oppdrive gode satser for utslipp fra en del av tiltakene som inngår i KVV Green, bl.a. som følge av at mange av tiltakene innebærer ombygging av eksisterende infrastruktur (i motsetning til nybygging) eller bruk av relativt ny teknologi det finnes liten erfaring med å få analyser av. Satsene som er benyttet, hvordan de er beregnet, og kildegrunnlaget, er beskrevet nærmere i tabellen under, samt påfølgende delkapitler der ytterligere forklaringer er nødvendig.

Tabell 2 Satser som er benyttet til klimagassberegningen, alle tall i tonn CO<sub>2</sub>-ekv.

	Opprinnelig sats		Kilde og omregningsfaktorer	Sats som benyttes i beregningene		
	Klimagasser A1-A5	Klimagasser direkte fra A5 (anleggsplass)		Klimagasser A1-A5	Klimagasser direkte fra A5 (anleggsplass)	Enhet
Ombygging av tunneler	15 534,1	1 381,5	Tidligfaseverktøy v. 6, enkeltsporet tunnel i berg. 0,44 m <sup>2</sup> /83 m <sup>2</sup> tverrsnitt	82,1	7,3	per km tunnel
Overgangsbru, krevende	12,3	0,2	Tidligfaseverktøy v. 6, 2-felts veibru.	12,3	0,2	per løpemeter bru
Overgangsbru, resten			Tidligfaseverktøy v. 6, 2-felts veibru. 1/3 av ny bru	4,1	0,1	per løpemeter bru
Ny jernbanebru	32,9	0,8	Tidligfaseverktøy v. 6, enkeltsporet bru.	32,9	0,8	per løpemeter bru
Kontaktledningsanlegg	13 675,0	6 967,0	Erfaringstall Trønder- og Meråkerbanen. Fordelt på 120 km som ble elektrifisert	114,0	58,1	per km med kontaktledning
Omformerstasjon	865,0	173,0	Erfaringstall Trønder- og Meråkerbanen.	865,0	173,0	per omformerstasjon
Hydrogendepot			Antatt lik omformerstasjon over levetiden, omregnet fra 60 til 20 års levetid	288,3	57,7	per hydrogenfyllstasjon
Nye jernbanespor	4 622,6	1 370,7	Tidligfaseverktøy v. 6, enkeltspor middels grunnforhold.	4622,6	1370,7	
Nye veier	783,8	388,9	Tidligfaseverktøy v. 6, 2-felts vei i dagen.	783,8	388,9	per km vei
Vedlikehold av kontaktledningsanlegg	0,4	0,3	Totale utslipp fra jernbanens drift og vedlikehold fordelt på	0,4	0,3	per km per år



			antall km jernbane. 9% medgår til KL iht. Tidligfaseverktøyet v.6			
Batterier (er antatt å inkludere selve batteriet og tilhørende utstyr)	0,1		Mohr (et. al), 2020, IVL Swedish Environmental Research Institute Ltd., 2017 og 2019 Gjennomsnittlig levetid 15 år	0,007		per kWt installert batteri per år
Hydrogenutstyr regiontog	103,8		Hydrogenutstyr ombord kjøretøy (er antatt å inkludere hydrogentankene, brenselcellen, og tilhørende utstyr) Usai et. Al. 2021, <i>Life cycle assessment of fuel cell systems for light duty vehicles, current state-of-the-art and future impacts</i>			per kjøretøy
Hydrogenutstyr fjern tog	232,6		Som for hydrogenutstyr regiontog.			per kjøretøy
Hydrogenutstyr godslokomotiv	416,3		Som for hydrogenutstyr regiontog.			per kjøretøy
Vedlikehold av spor uten kontaktledning	17,2	1,3	Tidligfaseverktøy v. 6, enkeltspor, minus 9% til vedlikehold av kontaktledning	15,7	1,2	per km per år

### 3.1 Nærmere forklaring av satsene

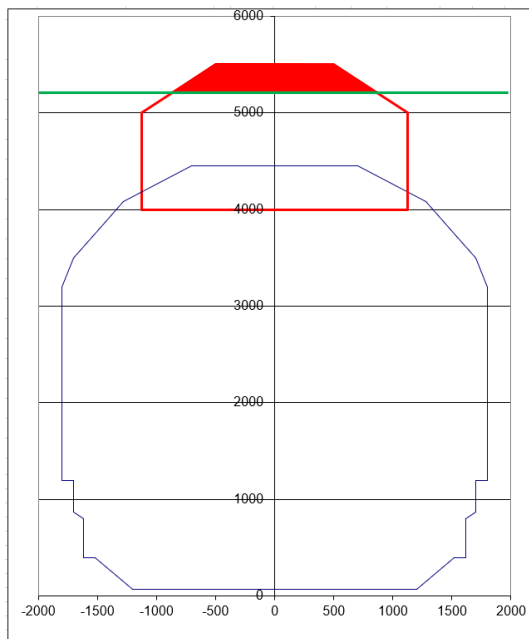
#### 3.1.1 Tunneler

For tunneler er det tatt utgangspunkt i Tidligfaseverktøy v.6. Det er beregnet utslipp per løpemeter tunnel i berg, per meter. Den største andelen tunneler på banene er bergtunneler. Det er imidlertid behov for å beregne utslipp som følge av ombygging av eksisterende tunneler, ikke nybygging.

Se figur nedenfor, som viser en vanlig kjøretøyprofil i blått, og nødvendig profil i tunnel for elektrifisering, i rødt omriss. Det som finnes av tilgjengelige data for høyde i tunneler på de ikke elektrifiserte strekningene, tilsier at tunnelene som er for lave, er i snitt 5,23 meter høye, markert i grønt. Det er stor usikkerhet heftet ved dette tallet, som følge av manglende infrastrukturdata. Det er beregnet utslipp fra strossing av kun den andelen av tunnellopet som antas å måtte fjernes i forbindelse med en elektrifisering, markert med rødt fyll. Dette arealet utgjør i snitt 0,44 m<sup>2</sup> i de tunnelene som er for lave.

Utslippene for utvidelse av tunnel er dermed beregnet som en andel av utslippene ved utvidelse av hele løpet, basert på et tverrsnitt på 83 m<sup>2</sup> (også iht. tidligfaseverktøy 6). 83 m<sup>2</sup> er beregningsgrunnlaget for tverrsnitt i nye tunneler som er lagt til grunn i tidligfaseverktøyet. Tverrsnittet som legges til grunn for nye tunneler er betydelig større enn i de stort sett veldig gamle tunnelene på de ikke-elektrifiserte banene. Det er forutsatt at utvidelse av tunnelene for å få plass til kontaktledningsanlegg ikke vil medføre krav om å utvide og oppgradere tunnelene til nyere standard. Det er mulig at et tverrsnitt på 83 m<sup>2</sup> er større. Tverrsnittet som er lagt til grunn er imidlertid omdiskutert i prosjektgruppen, da 83 m<sup>2</sup> mistenkes å være for stort. Dette forventes ikke å innvirke på resultatets gyldighet, ettersom tidligfaseverktøyet beregning er konsistent med 83 m<sup>2</sup>. Usikkerheten for dette estimatet er høy, men akseptabel sett i forhold til andre satser som vurderes som langt mer usikre på dette tidspunktet.

Dette er ombygging av eksisterende infrastruktur, og det er ikke regnet reinvesteringer i perioden, da det vil være behov for dette også i referansealternativet.



Figur 5: Tunnelprofil ved elektrifisering.

### 3.1.2 Overgangsbruer

For overgangsbruer i kategorien krevende er det antatt at bruene må bygges på nytt, eller annen krevende ombygging er påkrevd. Det er dermed benyttet utslipp fra bygging av ny tofelts veibru, iht. tidligfaseverktøy v. 6, per løpemeter bru.

For øvrige veibruer forventes det å være mulig å bygge om bruene med enklere virkemidler (heving i én eller begge ender). Mange av disse bruene er veibruer med ett løp og forholdsvis enkel konstruksjon. Det er antatt en sats på 1/3 av utslipp av bygging av ny veibru, per løpemeter.

Dette er ombygging av eksisterende infrastruktur, og det er ikke regnet reinvesteringer i perioden, da det vil være behov for dette også i referansealternativet.

### 3.1.3 Ny jernbanebru

Beregnet med utgangspunkt i tidligfaseverktøy v. 6. Dette er ombygging av eksisterende infrastruktur, og det er ikke regnet reinvesteringer i perioden, da det vil være behov for dette også i referansealternativet.

### 3.1.4 Kontaktledningsanlegg og omformerstasjon

Satsene er beregnet med utgangspunkt i erfaringstall fra elektrifisering av Trønder- og Meråkerbanen. Den aktuelle omformerstasjonen er Hell omformerstasjon.

Levetid kontaktledningsanlegg: 75 år

Levetid omformerstasjoner: 60 år

### 3.1.5 Hydrogendepot

Prosjektet har ikke hatt tilgang til utslippstall fra hydrogenfyllestasjoner (tankanlegg, kompressorer, dispenserenheter og andre tekniske installasjoner.). Det er dermed antatt at utslippet vil være likt som for omformerstasjoner over livsløpet, og faktoren er kun omregnet for å håndtere en antatt levetid på 20 år, sammenlignet med 60 for omformerstasjoner.

Det påpekes at dette anslaget anses som svært usikkert.

### 3.1.6 Nye jernbanespor og veier

Satser er hentet fra tidligfaseverktøy 6.

Levetiden er satt til 75 år. Dette er en forenkling, ettersom levetiden for under- og overbygning er ulik. Vei har normalt også kortere levetid enn spor.

### 3.1.7 Vedlikehold av kontaktledningsanlegg

Det er innhentet totale utslipp fra jernbanens drift og vedlikehold, som så er fordelt på antall km jernbane. Det er estimert at cirka 9% av utslippene medgår til kontaktledningsanlegg, iht. Tidligfaseverktøyet v.6, og dette estimatet er dermed fordelt på antall km jernbane som grunnlag for satsen benyttet i denne beregningen.

### 3.1.8 Batterier

Det er benyttet flere kilder for utslipp fra batterier, og det er hentet ut en sats som anses å være representativ for typen batterier som forutsettes i denne analysen. Det er antatt at lithium-ion batterier benyttes, og det er for batterikjemien også gjort en antagelse om at det er mest sannsynlig med høyeffektbatterier (f.eks. LFO/LTO) for denne applikasjon. Valg av batterikjemi påvirker flere av batteriets ytelser, herunder levetid i antall sykluser, energi per vekt og volum, mulig effektflyt per vekt og volum og batteriets generelle sikkerhet. Høyeffektbatterier skårer høyt på sikkerhet og effektflyt per vekt og volum, men skårer lavere på energi per vekt og volum og på anskaffelsespris per installert energimengde.

Satsen lagt til grunn i denne analysen er hentet fra en litteraturstudie publisert i «Journal of Industrial Ecology» og er på 100 kg Co2-ekv/kWh installert batteri (Mohr. et.al, 2020). Satsen er kontrollert og vurdert opp mot to påfølgende forskningsstudier publisert av IVL Swedish Environmental Research Institute Ltd (Report No. C243, 2017 og Report No. C444, 2019). For mer informasjon om antagelser og forutsetninger for satsen, se kap 5 om usikkerhet.

Det er antatt en gjennomsnittlig levetid på 15 år for batteriene i alle konsepter, men dette kan forventes å variere iht. kjøretøyenes bruksmønster. Dette er også basert på at det er antatt å være høyeffektbatterier som vil bli brukt i denne sammenheng. Satsene for nye batterier er regnet om til en årlig utslippsfaktor knyttet til fornyelse av batterier.

I beregningene er det trukket fra utslipp knyttet til små batterier som antas å benyttes på bimodale (diesel-el) kjøretøy i referansealternativet.

Tabell 3: Batteristørrelser [kWh] for hvert konsept og kjøretøyskategori.

Konsept	Regiontog i distrikt	Regiontog	Fjerntog	Godslokomotiv
0	50	100	150	200
2a/b	200	400	600	800
3	400	800	1300	2600

### 3.1.9 Hydrogenutstyr ombord kjøretøy

Det er tatt utgangspunkt i en studie fra 2021 av Usai et al. Studien gjennomfører en livssyklusvurdering av et hydrogensystem for en personbil, basert på teknologi i markedet. Det er derfor nødvendig å skalere resultatene fra studien for å tilpasse til jernbanekjøretøyene i KVUen. Studien utgår fra et «Cradle-to-Grave»-perspektiv, som inkluderer hele kjeden i Figur 1. Det skal nevnes at det er usikkerhet rundt tallene for utslipp fordi det kan gjøres forskjellige antagelser om produksjonsmetoder, forskjellige produsenters tekniske løsninger og energimiks brukt i beregningene.

For å kunne kvantifisere utslipp fra produksjon og bruk av hydrogenutstyr i tog for hele kjeden i Figur 1 så er det nødvendig å presisere hva som inkluderes i beregningen. I studien fra Usai et al. er det identifisert at det er hydrogentankene, katalysatoren, hjelpeutstyr og «bipolar plates» som står for mer enn 90% av

utslippene. Tabell 4 viser omtrentlige tall for utslipp fra disse delsystemene, med hensyn til at systemene er dimensjonert for en effekt på 80kW og tankstørrelse på 5kg hydrogen.

Tabell 4: Satser for delsystem (ombord) for hydrogenalternativene

Utstyr	Utslipp [CO2-ekv for 80kW effekt og 5kg hydrogentanker]	Kommentar
Hydrogentank	1959	Skaleres med tankstørrelse
Katalysator	1182	Skaleres med effekt
Hjelpeutstyr	854	Skaleres med effekt
Bipolar plates	707	Skaleres med effekt

For å beregne tilsvarende utslipp for kjøretøyene brukt i denne studien opprettes Tabell 5 som viser utslippene skalert med antatt tankstørrelse og effekt på brenselcelle.

Tabell 5: Skalering av ombordsystem for hydrogen på tog

Kjøretøy	Regiontog		Fjerntog		Godslokomotiv	
	Antatt størrelse i toget	Utslipp av CO2 [kg]	Antatt størrelse i toget	Utslipp av CO2 [kg]	Antatt størrelse i toget	Utslipp av CO2 [kg]
Hydrogentank	125kg	*1959/5=48975	375kg	*1959/5=146925	800kg	*1959/5=313440
Katalysator	1600 kW	*1182/80=23640	2500 kW	*1182/80=36938	3000 kW	*1182/80=44325
Hjelpeutstyr		*854/80=17080		*854/80=26688		*854/80=32025
Bipolar plates		*707/80=14140		*707/80=22094		*707/80=26513
<b>Summert</b>		<b>103835</b>		<b>232645</b>		<b>416303</b>

For å kunne beregne utslippene per år er det nødvendig med informasjon om levetiden på utstyret. For å sjekke verdiene opp mot andre kilder er det hentet informasjon fra produsenten Ballard og deres FCmove produkt. Produktet er markedsført for «heavy duty motive applications» og er typisk for busser. Verdiene brukt for denne KVV er skalert til størrelsen for jernbanekjøretøyene som analyseres. Produsenten oppgir at levetiden vil være omtrent 30 000 timer på hele systemet. Med en brukstid på 18 timer per døgn, og 320 døgn i året (for tog), vil levetiden i antall år være omtrent 5 år. Det er derfor antatt 5 års levetid i beregningene.

Ballard beskriver at for selve brenselcellen (som vil tilsvare alt uten hydrogentankene i Tabell 5) er utslippene for et 70 kW system cirka 5133 kg CO2-ekv (Ballard Power Systems Inc.). Skalert med effekten for f.eks. et regiontog vil utslippen være 117325 tonn CO2-ekv. Samme utstyr er i tabell 5 beregnet til 54860 tonn CO2. Ballard har altså et beregnet utslipp som blir dobbelt så høyt. Dette vil bli tatt med i diskusjonen om usikkerhet i kapittel 5.

### 3.1.10 Vedlikehold av spor

Satser for vedlikehold av enkeltspor er hentet fra tidligfaseverktøy v. 6. Det er trukket fra 9% til vedlikehold av kontaktledningsanlegg, ettersom det ikke vil være kontaktledningsanlegg på sporene inn til hydrogendepotene.

### 3.2 Oversikt over bruk av satser

Følgende tabell gir en oversikt over satser som benyttes i hvert konsept.

Tabell 6: Oversikt over hvilke satser som benyttes i hvilke konsepter

	2a Hydrogen	2b Hydrogen med del-elektrifisering	3 Batteri	4 Elektrifisering
Ombygging av tunneler			x	x
Overgangsbru, krevende			x	x
Overgangsbru, resten		x	x	x
Ny jernbanebru			x	x
Kontaktledningsanlegg		x	x	x
Omformerstasjon		x	x	x
Hydrogenfyllestasjon	x	x		
Nye jernbanespor	x	x		
Nye veier	x	x		
Vedlikehold av kontaktledningsanlegg		x	x	x
Batterier	x	x	x	
Hydrogenutstyr ombord kjøretøy	x	x		
Vedlikehold av spor uten kontaktledning	x	x		

# 4 Resultater

## 4.1 Referansealternativet (0 Fossil diesel)

Det forutsettes utslipp i 2030 som vedtatt i henhold til innblandingskrav for biodiesel i 2023. Utslipet av klimagasser (bruksfase – direkte) er beregnet til **70 000 tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter per år**, basert på togtilbudet i referansealternativet og definert kjøremønster i utredningens energisimuleringer.

## 4.2 Hydrogen (2a)

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.

Det er i livsløpsanalysen tatt høyde klimagasser forbundet med etablering av nødvendig infrastruktur (inkl. ombordutrustning), produksjon og drift over analyseperioden for hver ikke-elektrifiserte strekning. For livsløpsberegninger av hydrogenfyllestasjoner, har vi ikke lyktes i å fremskaffe informasjon om nødvendige komponenter som grunnlag for beregningene. Vi har derfor lagt til grunn samme faktor for hydrogenfyllestasjon som for omformerstasjoner, men presiserer at dette anslaget er høyst usikkert og sannsynligvis for lavt gitt sikringstiltakene som legges til grunn i alternativanalysen.

For utstyret i kjøretøyene er det brukt en vitenskapelige kilder og informasjon fra en produsent av hydrogenutstyr ombord kjøretøy for å beregne utslipp for disse. Dette er presentert i kapittel 3.1.9.

### 4.2.1 Klimagassutslipp forbundet med utbygging av alternativet

Tiltaksbehov på infrastruktur for konsept 2a innebærer etablering av hydrogenfyllestasjoner med sikringstiltak og nye spor til fyllestasjonene. Det er ikke identifisert tiltaksbehov på eksisterende infrastruktur som utvidelse av tunnelprofiler.

Overgang til hydrogendrift vil imidlertid medføre at hele dagens flåte av kjøretøy som i referansealternativet trafikkerer de ikke elektrifiserte 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, der dagens energivogn med dieselmotorer eventuelt kan byttes ut med en hydrogenvogn. Dette er imidlertid høyst usikkert og lite sannsynlig. Nye tog må uansett anskaffes over analyseperioden, uavhengig av hvilket alternativ som legges til grunn. I KVV Green ser vi kun på det som skiller alternativene av hensyn til forenkling. Klimagassutslipp forbundet med å bygge nye tog er dermed ikke inkludert for noen av alternativene, da det er alternativenes energiegenskaper og nødvendig infrastruktur og komponenter som er gjenstand for analyse.

Tabell 7 viser klimagassutslippene fra anleggsfasen for hver bane og fordelt på direkte og indirekte utslipp. Hydrogendepot og spor til hydrogendepot utgjør den største delen av utslippene.

Tabell 7: Konsept 2a, klimagassutslipp fra anleggsfase, tonn CO<sub>2</sub>-ekv.

	Nordlandsbanen		Raumabanen		Røros- og Solørbanen		Sum	
	Direkte	Indirekte	Direkte	Indirekte	Direkte	Indirekte	Direkte	Indirekte
Omformerstasjoner								
Kontaktledningsanlegg								
Utvidelse av tunnelprofil								
Overgangsbruer								

Hydrogendepot	1153	4613	231	923	692	2768	2076	8304
Spor til hydrogendepot	2330	5528	151	358	1426	3382	3907	9268
Vei til hydrogendepot	739	750	78	79	583	592	1400	1422
Sum	4222	10892	459	1359	583	592	7382	18994
<b>Sum direkte og indirekte</b>	15114		1819		9443		26376	

#### 4.2.2 Klimagassutslipp forbundet med drift av alternativet over analyseperioden

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. Utover dette forsynes øvrig hjelpeutstyr i toget. Dette sikrer fremdrift av kjøretøyet. Et hydrogentog kan beskrives som et batterielektrisk kjøretøy med en hydrogendrevet batterilader.

Levetiden på batteriene antas å være 15 år, altså at batteriene forventes å måtte utskiftes etter 15 års drift. For å gjennomføre energisimuleringer av driften, og for å regne på total kostnadene og klimagassutslippene, er det lagt til grunn en generisk batteristørrelse for de ulike kategoriene kjøretøy. Det er usikkert hvor stort dette batteriet vil være i praksis og at det er kjøretøysprodusenten som foretar en slik optimalisering av størrelsen i henhold til infrastrukturen og driftsprofilen.

For hydrogenkjøretøy (konsept 2a/2b) er det omtrent halvparten av den batteristørrelse som er brukt for del-elektrifiseringskonseptet (konsept 3). For dieselskjøretøy (konsept 0) er det også antatt et lite batteri brukt for energioptimering, og som i sin tur er omtrent halvparten av det i et hydrogenkjøretøy. For klimafotavtrykk fra batteriproduksjon er det innhentet faktorer for høyeffekt-batterier av typen LFO/LTO. For mer informasjon, se kap. 3 om forutsetninger for beregningene. Batterier resulterer kun i indirekte utslipp.

Det legges til grunn 300 meter nytt enkeltspor per hydrogenfyllstasjon. Det er til sammen kartlagt et behov for ni hydrogenfyllstasjoner fordelt på de tre ikke-elektrifiserte strekningene. Disse nye sporene vil også medføre klimagassutslipp utover analyseperioden, der levetiden for hver komponent i jernbaneinfrastrukturen (ekskludert kontaktledningsanlegg) er lagt til grunn for å estimere tidspunkt for utskiftning og tilhørende arbeid. Lignende faktorer er ikke innhentet for nye veiforbindelser, men disse utslippene er samtidig antatt å være marginale.

Tabell 8 viser klimagassutslippene fra driftsfasen for hver bane og fordelt på direkte og indirekte utslipp. Hydrogenutstyr ombord kjøretøy utgjør den største delen av utslippene.

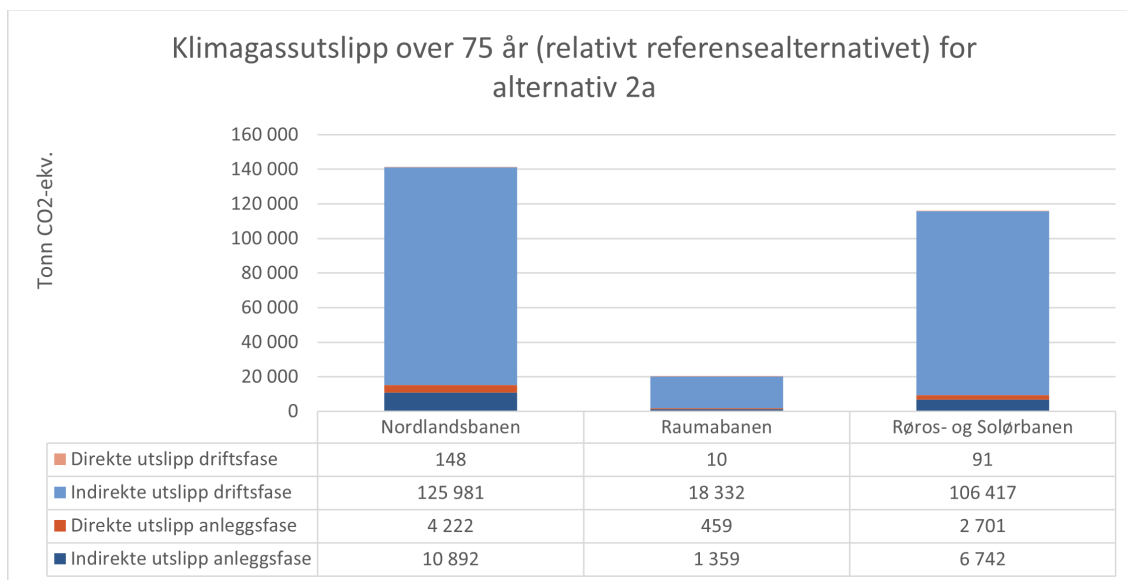
Tabell 8: Konsept 2a, klimagassutslipp fra driftsfasen eks. togtrafikk, tonn CO<sub>2</sub>-ekv.

	Nordlandsbanen		Raumabanen		Røros- og Solørbanen		Sum	
	Direkte	Indirekte	Direkte	Indirekte	Direkte	Indirekte	Direkte	Indirekte
Kontaktledningsanlegg								
Batterier		96		14		72		182
Hydrogenutstyr ombord kjøretøy		1559		229		1332		3120
Drift og vedlikehold av spor til fyllstasjoner	2	25	0	2	1	15	3	41
Sum per år	2	1680	0	244	1	1419	1	3343

Sum direkte og indirekte over 75 år	126130	18341	106508	250979
-------------------------------------	--------	-------	--------	--------

#### 4.2.3 Oppsummering av resultater fra anleggs- og driftsfase

De totale utslippene for dette alternativ domineres av indirekte utslipp fra driftsfasen. Se Figur 1. Det er hydrogenutstyret ombord kjøretøyet som er den primære driveren klimagassutslippene.



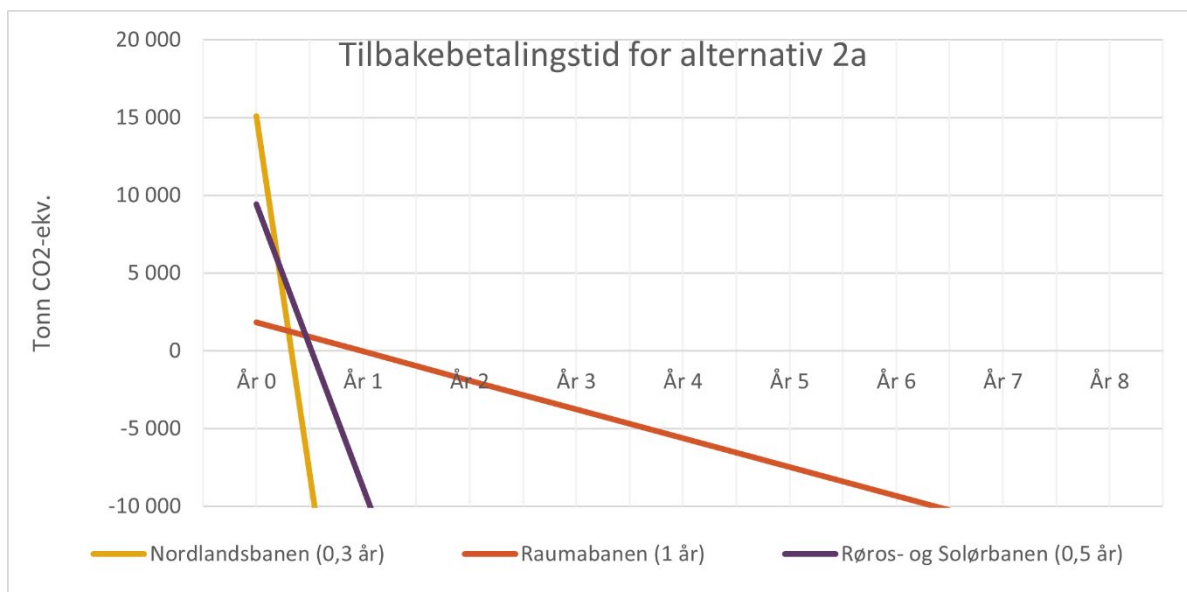
Figur 6: Klimagassutslipp for alternativ 2a per bane.

#### 4.2.4 Tilbakebetalingstid

Tilbakebetalingstiden illustrerer hvor lang tid det tar før konseptet når nullpunktet (klimanøytralitet) og gir utslippsbesparelser som grunnlag for effektmåloppnåelse. Her er endring i utslipp fra trafikk, sammenlignet med referansealternativet, den sentrale avkortningsfaktoren. Nullpunktet er et uttrykk for når konseptalternativet medfører utslippsreduksjoner etter at klimagassutslippene fra utbygging og drift er kompensert gjennom drift av nullutslippsløsningen. Dette nullpunktet vil derfor variere på de ulike banestrekningene, avhengig av hvor omfattende investeringstiltakene er, og hvor mye trafikk som antas over analyseperioden.

For dette konsept vil tilbakebetalingstiden være størst for Raumabanen (1 år) og kortest for Nordlandsbanen (0,3 år). Se Figur 2. Det er vurdert at tilbakebetalingstiden er kort for alle banene og indikerer at tiltakene er gunstige fra et utslippsperspektiv.





Figur 7: Tilbakebetalingstid for alternativ 2a.

### 4.3 Hydrogen med del-elektrifisering (2b)

I dette konseptet er det elektrifisert på deler av strekningen hvor kjøretøyene har stort energibehov. Det er lite elektrifisering sammenlignet med hele linjens strekning, og formålet er å redusere bruket av hydrogen uten å installere store mengder kostbar infrastruktur for KL-anlegg.

#### 4.3.1 Klimagassutslipp forbundet med utbygging av alternativet

Det skiller på enkle og krevende bruer, hvor det er identifisert til sammen 30 enkle bruer og 15 krevende bruer, hvor 4 må erstattes i sin helhet (fagverksbruer).

Det er antatt samme antall og plassering av hydrogenfyllestasjoner som for konsept 2a. Det vil ikke være behov for utvidelse av tunneler for dette konsept, og det er kun noen få overgangsbruer som påvirkes. Dette forklares av at elektrifiseringen er plassert for å unngå kostbar endring i infrastruktur og for å forsyne kjøretøyet med elektrisk energi fra KL hvor energibehovet er størst.

Tabell 9 viser klimagassutslippene fra anleggsfasen for hver bane og fordelt på direkte og indirekte utslipp. Kontaktledningsanlegg, hydrogendepot og spor til hydrogendepot utgjør den største delen av utslippene.

Tabell 9: Konsept 2b, klimagassutslipp fra anleggsfase, tonn CO2-ekv.

	Nordlandsbanen		Raumabanen		Røros- og Solørbanen		Sum	
	Direkte	Indirekte	Direkte	Indirekte	Direkte	Indirekte	Direkte	Indirekte
Omformerstasjoner	692	2768	346	1384	346	1384	1384	5536
Kontaktledningsanlegg	4251	4093	1616	1556	1940	1868	7807	7517
Utvidelse av tunnelprofil								
Overgangsbruer	2	179			4	280	6	459
Hydrogendepot	1153	4613	231	923	692	2768	2076	8304
Spor til hydrogendepot	2330	5528	151	358	1426	3382	3907	9268

Vei til hydrogendepot	739	750	78	79	583	592	1400	1422
Sum per år	9167	17931	2421	4300	4990	10275	16579	32505
<b>Sum direkte og indirekte</b>	27099		6721		15265		49085	

#### 4.3.2 Klimagassutslipp forbundet med drift av alternativet over analyseperioden

Som for konsept 2a er det brukt et batteri som blir inkludert som et indirekte utslipp.

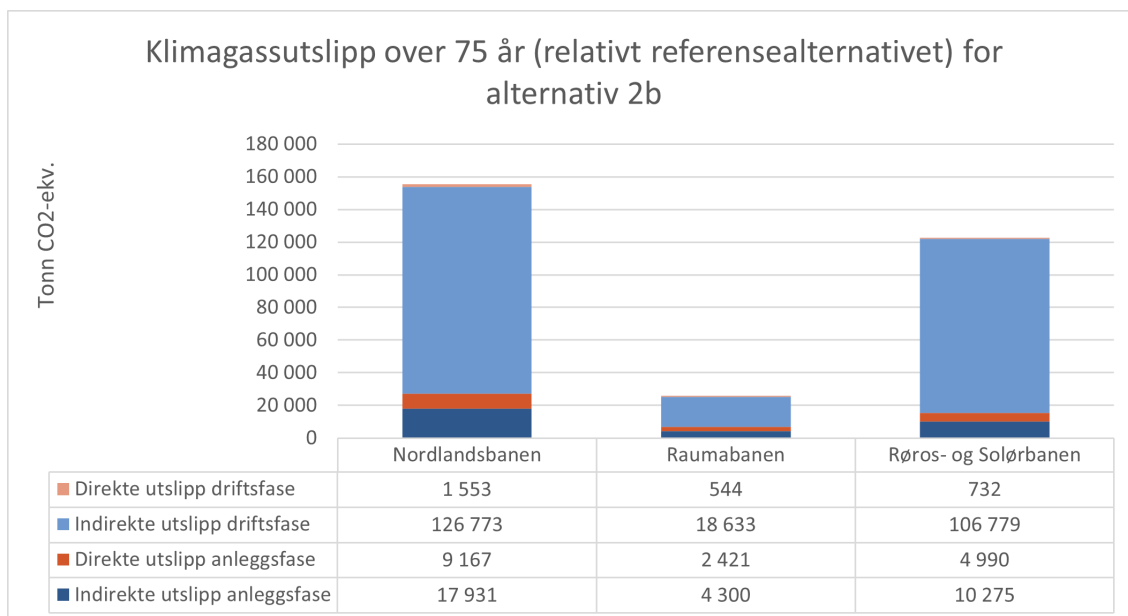
Tabell 10 viser klimagassutslippene fra driftsfasen for hver bane og fordelt på direkte og indirekte utslipp. Hydrogenutstyr ombord kjøretøy utgjør den største delen av utslippene.

Tabell 10: Konsept 2b, klimagassutslipp fra driftsfase eks. togtrafikk, tonn CO<sub>2</sub>-ekv.

	Nordlandsbanen		Raumabanen		Røros- og Solørbanen		Sum	
	Direkte	Indirekte	Direkte	Indirekte	Direkte	Indirekte	Direkte	Indirekte
Kontaktledningsanlegg	19	11	7	4	9	5	34	19
Batterier		96		14		72		182
Hydrogenutstyr ombord kjøretøy		1559		229		1332		3120
Drift og vedlikehold av spor og vei til depot	2	25	0	2	1	15	3	41
Sum per år	21	1690	7	248	10	1424	38	3362
<b>Sum direkte og indirekte over 75 år</b>	128326		19176		107510		255013	

#### 4.3.3 Oppsummering av resultater fra anleggs- og driftsfase

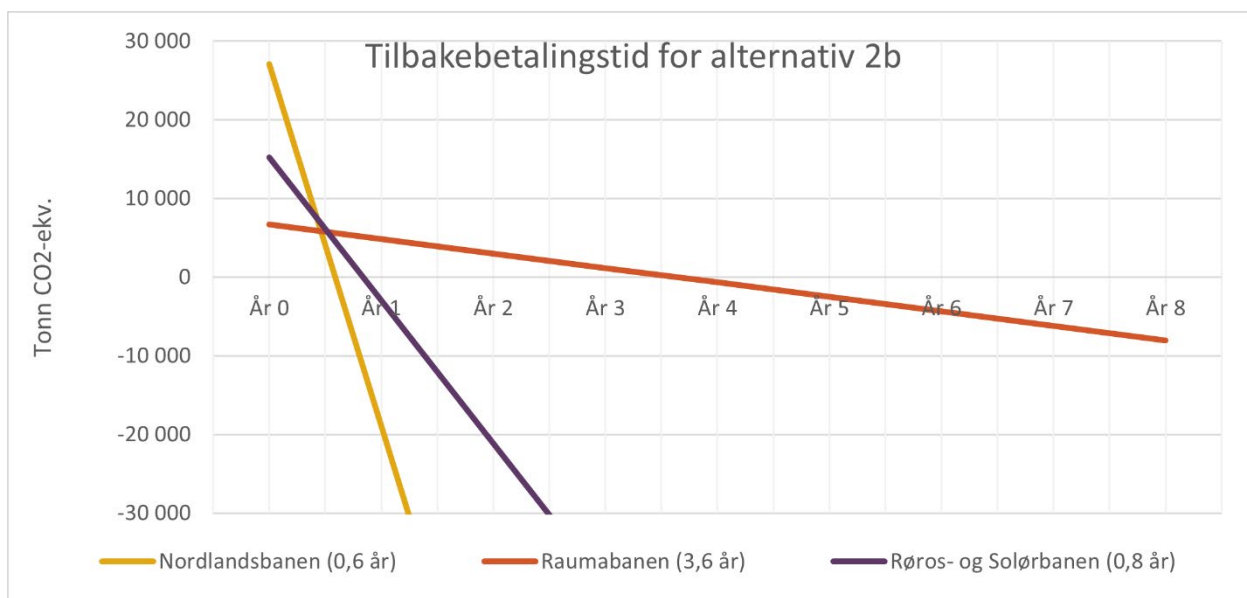
De totale utslippene for dette alternativ domineres av indirekte utslipp fra driftsfasen. Se Figur 6. Det er hydrogenutstyret ombord kjøretøyet som er den primære driveren for klimagassutslippene.



Figur 8: Klimagassutslipp for alternativ 2b per bane.

#### 4.3.4 Tilbakebetalingstid

For dette konsept vil tilbakebetalingstiden være størst for Raumabanen (3,6 år) og kortest for Nordlandsbanen (0,6 år). Se Figur 4. Det er vurdert at tilbakebetalingstiden er kort for alle banene og indikerer at tiltakene er gunstige fra et utslippsperspektiv, men hvor konsept 2b er generelt sett mindre gunstig enn konsept 2a fra et klimaperspektiv. Dette er spesielt synlig for Raumabanen, hvor etableringen av omformerstasjon og KL-anlegg skal betales av i drift av et betydelig mindre transportvolum enn for Nordlandsbanen, noe som gjør at tilbakebetalingstiden blir nesten 4 ganger så lang for 2b enn for 2a på Raumabanen.



Figur 9: Tilbakebetalingstid for alternativ 2b.

## 4.4 Batteri (3)

Alternativ 3 omhandler energibærer basert på lagring av elektrisitet i batterier, som vil kunne erstatte diesel og andre fossilbaserte drivstoff for jernbanen. Konseptet vil bestå av batterier og tilhørende system ombord kjøretøyet, og omformerstasjoner og KL-anlegg i infrastrukturen.

Det er i livsløpsanalysen tatt høyde for klimagasser forbundet med etablering av nødvendig infrastruktur, produksjon og drift over analyseperioden for hver ikke-elektrifisert strekning.

For beregning av utslipp knyttet til batteriene er det brukt vitenskapelige kilder, som presentert i kapittel 3.1.8.

### 4.4.1 Klimagassutslipp forbundet med utbygging av alternativet

Tiltaksbehov på infrastruktur for konsept 3 innebærer etablering av nye omformerstasjoner og KL-anlegg. Det vil være noe tiltaksbehov på eksisterende infrastruktur som utvidelse av tunnelprofiler, selv om dette unngås i stor grad med dette konsept.

Overgang til batteri vil imidlertid medføre at store deler av dagens flåte av kjøretøy som i referansealternativet trafikkerer de ikke elektrifiserte strekningene må byttes ut, og at det i tillegg må utvikles og investeres i energivogner for godstrafikken. Utskiftingen kan skje gradvis, da dieselskjøretøy og batterikjøretøy kan brukes på de samme strekningene samtidig.

Tabell 11 viser klimagassutslippene fra anleggsfasen for hver bane og fordelt på direkte og indirekte utslipp. Kontaktledningsanlegg og omformerstasjoner utgjør den største delen av utslippene.

Tabell 11: Konsept 3, klimagassutslipp fra anleggsfase, tonn CO<sub>2</sub>-ekv.

	Nordlandsbanen		Raumabanen		Røros- og Solørbanen		Sum	
	Direkte	Indirekte	Direkte	Indirekte	Direkte	Indirekte	Direkte	Indirekte
Omformerstasjoner	2076	8304	346	1384	692	2768	3114	12456
Kontaktledningsanlegg	18002	17333	3077	2963	17003	16371	38082	36666
Utvidelse av tunnelprofil	1	6			1	6	1	11
Overgangsbruer	4	335			28	2203	32	2538
Nye jernbanebruer					101	4008	101	4008
Hydrogendepot								
Spor til hydrogendepot								
Vei til hydrogendepot								
Sum	20083	25978	3423	4347	17824	25356	41330	55680
<b>Sum direkte og indirekte</b>	46061		7770		43180		97010	

### 4.4.2 Klimagassutslipp forbundet med drift av alternativet over analyseperioden

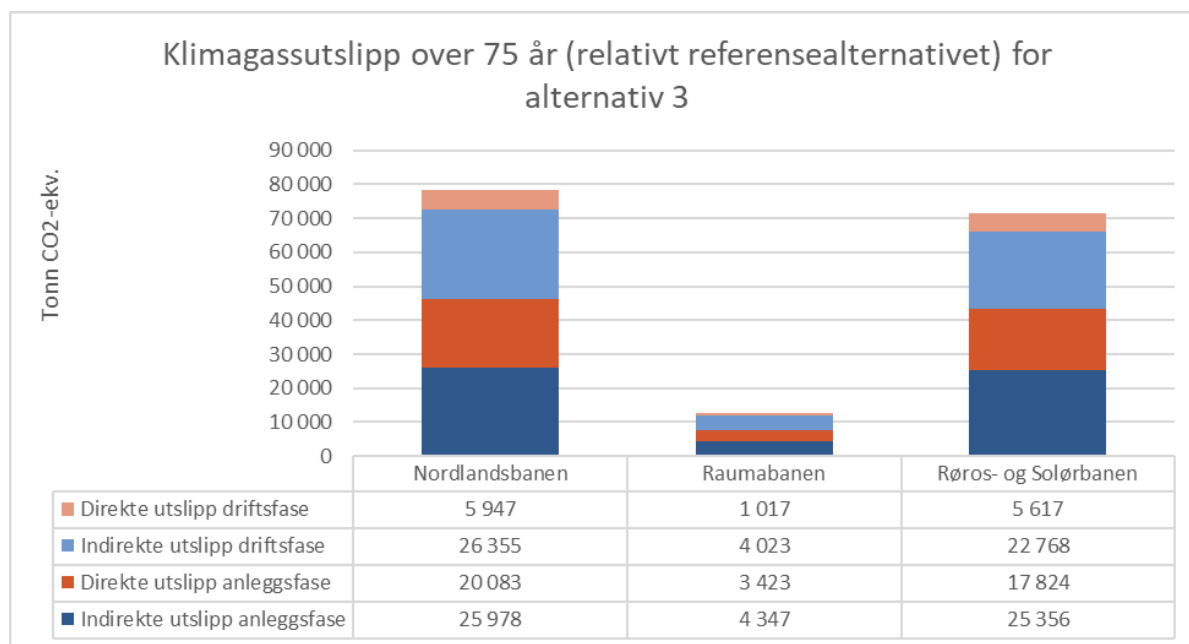
Se kapittel 3.1.8 og 4.2.2 for beskrivelse av antagelser for batterier. Tabell 12 viser klimagassutslippene fra driftsfasen for hver bane og fordelt på direkte og indirekte utslipp. Batterier (ombord kjøretøy) utgjør den største delen av utslippene.

Tabell 12: Konsept 3, klimagassutslipp fra driftsfase eks. togtrafikk, tonn CO2-ekv.

	Nordlandsbanen		Raumabanen		Røros- og Solørbanen		Sum	
	Direkte	Indirekte	Direkte	Indirekte	Direkte	Indirekte	Direkte	Indirekte
Kontaktledningsanlegg	79	45	14	8	75	42	168	95
Batterier	0	307	0	46	0	261	0	614
Drift og vedlikehold av spor til depot								
Sum per år	79	351	14	54	75	304	168	709
<b>Sum direkte og indirekte over 75 år</b>	32302		5040		28386		65728	

#### 4.4.3 Oppsummering av resultater fra anleggs- og driftsfase

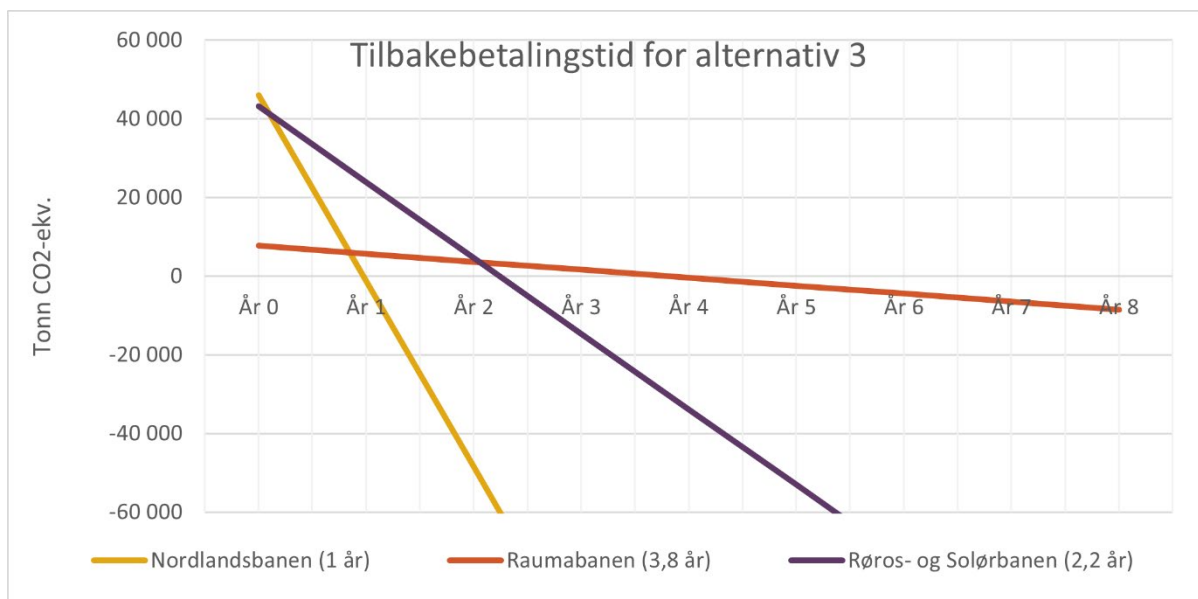
De totale utslippene for dette alternativ domineres av utslipp fra omformerstasjoner, kontaktledningsanlegg og batterier. Se Figur 8.



Figur 10: Klimagassutslipp for alternativ 3 per bane.

#### 4.4.4 Tilbakebetalingstid

For dette konsept vil tilbakebetalingstiden være lengst for Raumabanen (3,8 år) og kortest for Nordlandsbanen (1 år). Se Figur 9. Det er vurdert at tilbakebetalingstiden er kort for alle banene og indikerer at tiltakene er gunstige fra et utslippsperspektiv, men hvor tilbakebetalingstiden er generelt sett større enn for konsept 2a.



Figur 11: Tilbakebetalingstid for alternativ 3.

## 4.5 Elektrifisering (4)

Elektrifisert jernbane, eller elektrisk jernbane, er baner som er utstyrt med et kontaktledningsanlegg.<sup>3</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.

Kontaktledningssystemet er det mest brukte systemet for energiforsyning til jernbanekjøretøy i Norge, og utgjør om lag 66% av det nasjonale jernbanenettet (målt i antall banekm). 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.

Elektrifisert jernbane har mange gode egenskaper, men det har også en vesentlig utfordring. Det er høye investeringskostnader knyttet til bygging av KL-anlegg 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.

### 4.5.1 Klimagassutslipp forbundet med utbygging av alternativet

Tabell 13 viser klimagassutslippene fra anleggsfasen for hver bane og fordelt på direkte og indirekte utslipp. Kontaktledningsanlegg og omformerstasjoner utgjør den største delen av utslippene, etterfulgt av nye jernbanebruer.

<sup>3</sup> Beskrivelsen som følger er utformet på grunnlag av beskrivelsen av elektrifisering i NULLFIB Sluttrapport [25], s. 7.

Tabell 13: Konsept 4, klimagassutslipp fra anleggsfase, tonn CO2-ekv.

	Nordlandsbanen		Raumabanen		Røros- og Solørbanen		Sum	
	Direkte	Indirekte	Direkte	Indirekte	Direkte	Indirekte	Direkte	Indirekte
Omformerstasjoner	2076	8304	346	1384	692	2768	3114	12456
Kontaktledningsanlegg	42098	40533	6845	6590	28588	27525	77531	74649
Utvidelse av tunnelprofil	327	3349	16	164	11	112	354	3625
Overgangsbruer	19	1475	4	292	44	3461	66	5228
Nye jernbanebruer	197	7824	49	1924	101	4008	347	13756
Spor til hydrogendepot								
Vei til hydrogendepot								
Sum	44717	61485	7259	10355	29436	37874	81412	109714
<b>Sum direkte og indirekte</b>	106202		17614		67310		191126	

#### 4.5.2 Klimagassutslipp forbundet med drift av alternativet over analyseperioden

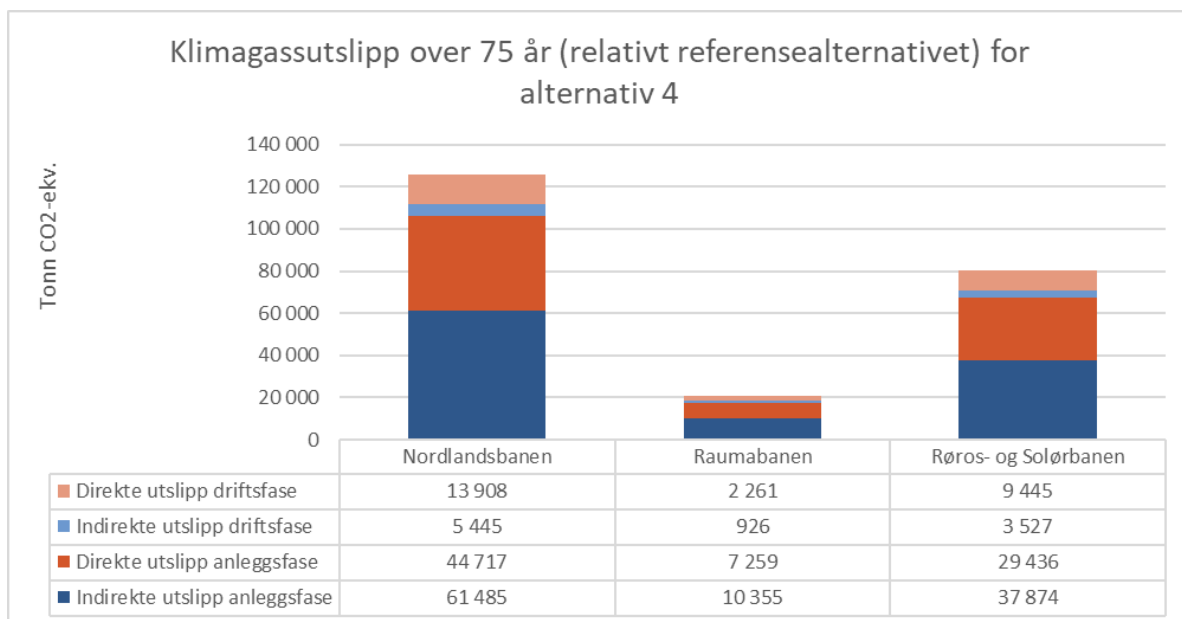
I Tabell 14 presenteres utslippene fra driftsfasen. Kontaktledningsanlegget utgjør den eneste delen av utslippene. Det skal poengteres at fordi det er antatt et mindre batteri for energioptimering i referansealternativet, og hvor et slik batteri ikke er antatt å være inkludert i elektrifiseringsalternativet, så vil dette alternativet ha en negativ verdi for den utslippskategorien.

Tabell 14 3: Konsept 4, klimagassutslipp fra driftsfase eks. Togtrafikk, tonn CO2-ekv.

	Nordlandsbanen		Raumabanen		Røros- og Solørbanen		SUM	
	Direkte	Indirekte	Direkte	Indirekte	Direkte	Indirekte	Direkte	Indirekte
Kontaktledningsanlegg	185	105	30	17	126	71	342	193
Batterier	-32		-5		-24		-61	
Drift og vedlikehold av spor til depot								
<b>Sum per år</b>	185	73	30	12	126	47	342	132
<b>Sum direkte og indirekte over 75 år</b>	19353		3187		12972		35512	

#### 4.5.3 Oppsummering av resultater fra anleggs- og driftsfase

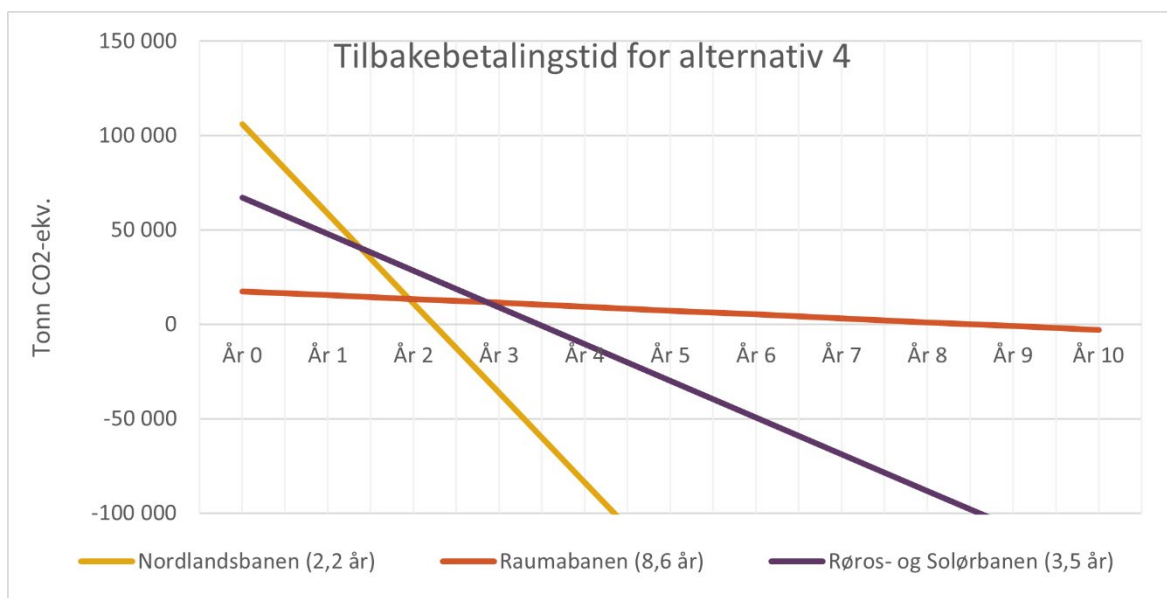
De totale utslippene for dette alternativ domineres av utslipp fra omformerstasjoner, kontaktledningsanlegg og nye jernbanebruer. Se Figur 10.



Figur 12: Klimagassutslipp for alternativ 4 per bane.

#### 4.5.4 Tilbakebetalingstid

For dette konsept vil tilbakebetalingstiden være størst for Raumabanen (8,6 år) og kortest for Nordlandsbanen (2,2 år). Se Figur 11. Det er vurdert at tilbakebetalingstiden er kort for Nordlandsbanen og Røros- og Solørbanen, og indikerer at tiltakene er gunstige fra et utslippsperspektiv på disse banene, men hvor tilbakebetalingstiden er generelt sett større enn for f.eks. alternativ 2a (hydrogen med del-el). For Raumabanen, som har betydelig lavere transportvolum, blir tilbakebetalingstiden høy sammenlignet med de andre banestrekningene.

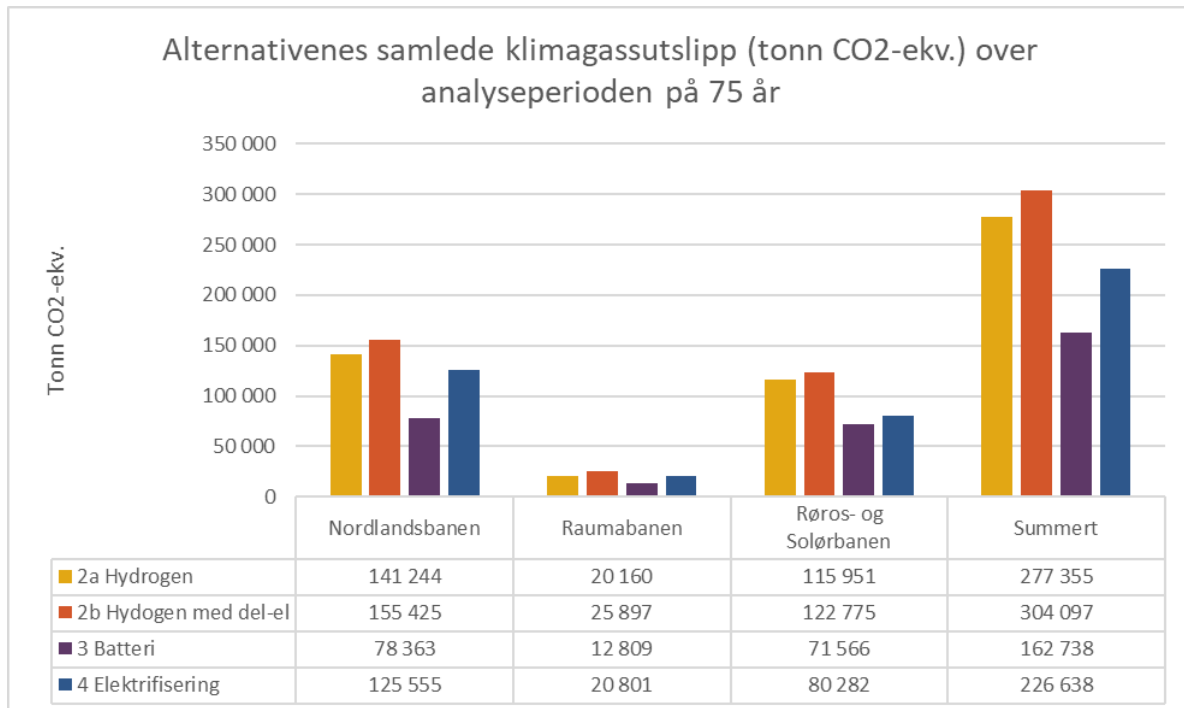


Figur 13: Tilbakebetalingstid for alternativ 4.



## 4.6 Samlede resultater

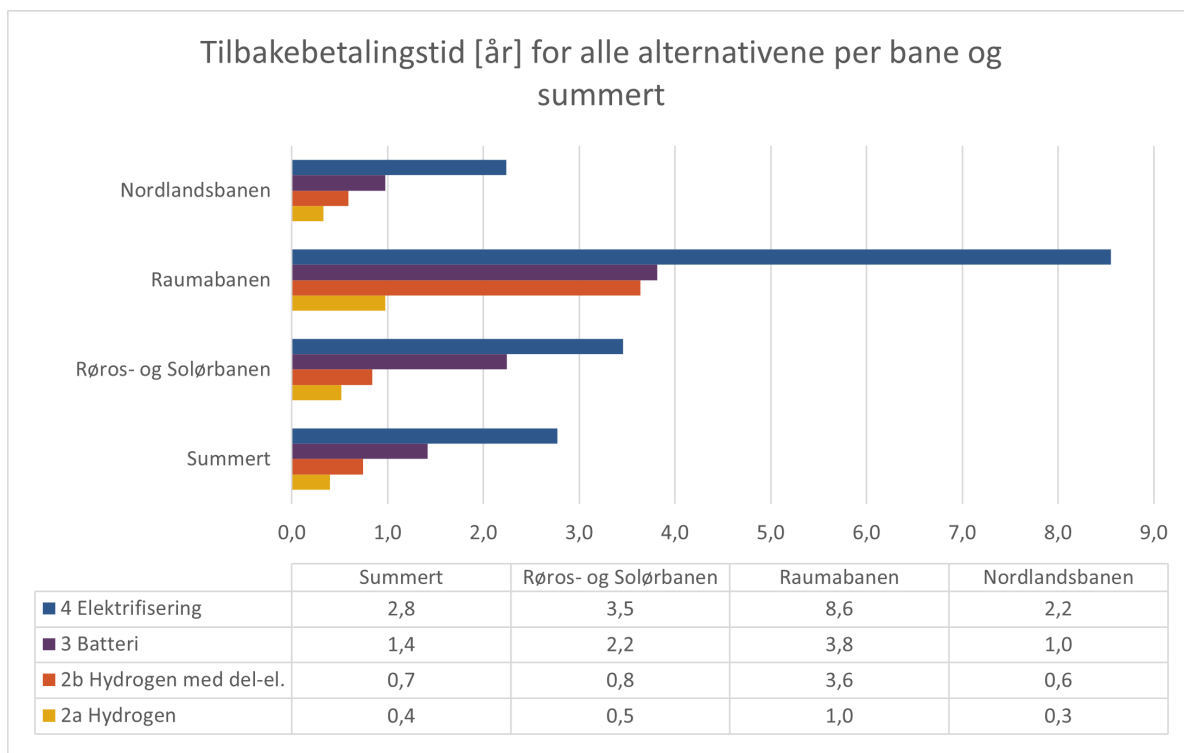
Figur 12 viser alternativenes samlede klimagassutslipp over analyseperioden på 75 år. Fordi konsept 0 er referansealternativet så vises det som «null». Alternativ 3 har lavest klimagassutslipp, og dette skyldes hovedsakelig at dette alternativet har lavere utslipp fra drift per år enn alternativ 2a/b, og lavere utslipp fra anleggsfasen enn alternativ 4.



Figur 14: Samlede klimagassutslipp for hver alternativ og bane.

Hydrogenalternativet 2a har den korteste tilbakebetalingstiden for hver bane som vist i Figur 13, og har dermed også den korteste tilbakebetalingstiden totalt for alle baner summert. Hydrogen med del-elektrifisering (2b) har på totalen nesten samme tilbakebetalingstid, tett fulgt av batterikonseptet (3). Batterikonseptet har lavere utslipp per år i drift, noe som medfører at forskjellen mellom alternativ 2a/b og alternativ 3 blir mindre over lengre tid. Dette er synlig på totalen, men også på Raumabanen hvor denne effekt gjør at alternativ 3 skårer bedre enn alternativ 2b innenfor 7 år. Den lange analyseperioden gjør at det lavere utslippet i drift fra alternativ 3 blir lavest på hele analyseperioden for alle baner. Alternativ 4 skårer lavest i tilbakebetalingstid, men har lavere utslipp enn alternativ 2a/b over analyseperioden.

Som figuren viser, er tilbakebetalingstiden summert for alle de tre banene, litt lengre enn for Nordlandsbanen alene, og kortere enn for de to andre banene. Det skyldes at Nordlandsbanen har lavere investeringsbehov sammenlignet med trafikkmengden enn de øvrige banene. Selv om Nordlandsbanen er den lengste, har den også betydelig mer trafikk enn Røros- og Solørbanen, og spesielt Raumabanen. Dersom man skulle innført ett konsept på alle tre baner, vil dermed de store netto reduksjon i klimagassutslipp som relativt raskt realiseres på Nordlandsbanen, være med å «betale ned» utslipp på de to andre banene som genereres av utbygging, anskaffelse av kjøretøy, samt drift og vedlikehold. Den summerte størrelsen er mest aktuell å benytte dersom man vurderer å innføre én og samme energibærer på alle tre baner.



Figur 15: Tilbakebetalingstid for alle alternativ og baner.

# 5 Usikkerhet og konklusjon

## 5.1 Usikkerhet i beregning av utslipp fra byggefase

Analysene viser at utslipp fra bygging av kontaktledningsanlegg jevnt over er den største utslippsdriveren i konseptene som innebærer bygging av kontaktledningsanlegg. Bygging av spor til hydrogendepoter er den største utslippsfaktoren i hydrogen-konseptene. Dette er rimelig å forvente, da disse komponentene innebærer bygging av ny jernbaneinfrastruktur, og dermed store mengder metall og betong, sammenlignet med ombygging av bruer og tunneler. Disse utslippene, samt utslipp fra nye jernbanebruer og omformerstasjoner, er blant de beregningene som anses som relativt sikre.

Andre utslipp i beregningen, deriblant ombygging av overgangsbruer, ombygging av tunneler, og etablering av hydrogendepoter, har betydelig høyere usikkerhet. Disse utslippene utgjør for det meste en relativt liten andel av de totale utslippene i hvert konsept. Unntaket er utslipp fra hydrogendepoter, som utgjør ca. 30 % av utslipp i konsept 2a, og som er svært usikker.

Det påpekes at klimagassberegningene også er beheftet med den samme usikkerheten som øvrige deler av alternativanalysen, bl.a. knyttet til mengdene som forutsettes. Her kan behov for ombygging av tunneler og heving av broer ved elektrifisering trekkes fram som usikre som følge av usikkerhet i infrastrukturdataene prosjektet har hatt tilgang til. Videre bør plassering av omformerstasjoner og hydrogendepoter, og dermed arealinngrep og behov for massetransport som følge av dette, anses å ha stor usikkerhet. I del-elektrifiseringsalternativene er det også noe usikkerhet knyttet til mengden kontaktledning som vil være nødvendig og anslaget bør anses som konservativt, da det legger dagens batteriteknologi til grunn. Usikkerhet for mengde kontaktledning gjelder i liten grad hel-elektrifisering. Antallet omformerstasjoner anses som et rimelig anslag i tidligfase, og det er primært mulighet for reduksjon i antall og/eller ombruk av eksisterende omformerstasjoner.

## 5.2 Usikkerhet i beregning av utslipp fra vedlikehold i driftsfase

Vedrørende utslipp fra drift, dvs. vedlikehold av kontaktledningsanlegg og nye spor, samt fornyelse av batterier, så har alle disse beregningene gode kilder. Den største usikkerheten for denne delen av beregningene skyldes satser for vedlikehold av øvrig infrastruktur, dvs. det som er utelatt fra beregningen som følge av manglende informasjon, og usikkerheten i klimagassberegning for hydrogenutstyr ombord kjøretøy.

For hydrogenutstyret er det tatt utgangspunkt i en vitenskapelig studie på området. Informasjonen er vurdert å ha god kvalitet. Utover dette er det sjekket mot beregninger foretatt av en produsent av hydrogenutstyr, og den produsentens beregninger viser omtrent dobbelt så høye utslipp for det samme utstyret. Det er derfor en vesentlig usikkerhet i disse tallene, og avviket kan muligvis skyldes blant annet beregningsmetode og antatt energimiks i produksjonen. Det er derfor vurdert at det er lite sannsynlig at utslippstallet brukt for hydrogenutstyr ombord er en overestimering.

Det antas at vedlikehold av omformerstasjoner, hydrogendepoter og vei til hydrogendepotene vil øke utslippene fra drift og vedlikehold. Batterier er en viktig driver av utslipp i driftsfase i de konseptene der dette inngår, og denne komponenten har lavere usikkerhet enn mange andre deler av beregningen, som følge av at både mengder og utslippsfaktorer har gode datakilder. For batterier er teknologiutviklingen kanskje den største usikkerheten.

Selv om tallene for utslipp fra batterier er vurdert å ha en god kilde, så er disse tallene avhengig av energimiksen i produksjonslandene, og delvis også produksjonsmetode. Studien som ligger til grunn for satsen (100 kg Co<sub>2</sub>-ekv/kWh batteri) er basert på et gjennomsnitt i den globale produksjonen basert på en litteraturstudie (Mohr.et.al, 2020). Det er ikke vurdert reduksjonspotensialet ved resirkulering av batteriene, da dette er en pågående debatt i academia om hvorvidt og hvor stor klimaeffekten netto er. Det er ikke vurdert reduksjonspotensialet ved resirkulering av batteriene, da det er omdiskutert om hvorvidt og hvor stor klimaeffekten netto er. Resirkulering av komponentene som må byttes ut i de ulike energibærerne er derfor ikke hensyntatt i denne analysen. Det påpekes imidlertid at fotavtrykket på 100 kg Co<sub>2</sub>-ekv/kWh batteri kan antas å reduseres de nærmeste årene, både på grunn av grønn produksjon og mer energieffektiv utnyttelse av råvarer (Mohr. et.al, 2020). Utover dette er det lagt til grunn 15 års levetid på

batteriene, som påvirkes av valg av batterikjemi, energieffektiv kjørestil og variasjon i energibehov mellom toglinjene.

### **5.2.1 Særlig usikkerhet rundt klimakonsekvensene ved hydrogenlekkasjer**

Forbrenning av hydrogen medfører ingen utslipp av klimagasser da avgassene er vanndamp og oksygen. Det er imidlertid en risiko for lekkasje av hydrogen til atmosfæren i forbindelse med produksjon, transport, tanking og fylling. Dette representerer en drivhuseffekt som ikke er hensyntatt i denne analysen.

En studie nylig publisert av forskningssenteret Cicero i tidsskriftet «Nature Communications Earth & Environment» finner at hydrogenlekkasjer har en oppvarmingseffekt som er nesten 12 ganger sterkere enn karbondioksid (Sand. et.al, 2023). Årsakene er at hydrogen skaper uheldige kjemiske reaksjoner som påvirker levetiden av andre drivhusgasser, og dermed bidrar indirekte til en oppvarmende effekt. Omfanget av slike hydrogenlekkasjer er også ukjent, hvor det vil bli nødvendig med systematisk overvåkning og rapportering ettersom teknologien modnes. En analyse fra «Center on Global Energy Policy» foreslår at en lekkasjerate på 4 prosent ved produksjon, 3-6 prosent lekkasjerate ved lagring, transport og fylling, og 0,6 prosent lekkasje fra sluttbruker (Fan. et.al, 2022). I et globalt perspektiv med dagens hydrogenproduksjon lagt til grunn, anslår forfatterne i studien at totale hydrogenlekkasjer ligger omtrent på 2,7 prosent (2,5 Mt).

Disse forholdene medfører en særskilt usikkerhet knyttet til klimarisiko av hydrogenalternativene. Selv om denne effekten kan argumenteres for å være utenfor LCA-rammeverket rent metodisk, så representerer det en risiko som kan redusere klimagevinstene av et hydrogenalternativ. En forenklet beregning på grunnlag av de ovenfornevnte satsene, tilsier at klimagassutslippene som følge av utslipp av hydrogen kan resultere i ca. 130 000 tonn CO<sub>2</sub>-ekv. over en periode på 75 år, noe som øker utslippene i hydrogenalternativene med ca. 50 % økte utslipp av CO<sub>2</sub>-ekv., sammenlignet med hovedanalysen. Det hersker dermed liten tvil over at klimareduksjonspotensialet for hydrogenalternativene på kort sikt er mindre enn hva denne KVUen legger til grunn. Selv om utslippene fra drift med hydrogen antas å være større enn det som legges til grunn i beregningene i denne rapporten, vil overgang til hydrogen fremdeles innebære en vesentlig reduksjon i klimagassutslipp i forhold til referansealternativet.

### **5.3 Konklusjon vedrørende klimakonsekvensene av de utredede konseptene**

I sum bør usikkerheten i beregningene av utslipp fra bygging og vedlikehold anses som relativt stor. Usikkerheten i tre av konseptene modereres ved at infrastrukturkomponenten som i størst grad driver utslippene, kontaktledningsanlegg, har lavere usikkerhet knyttet til både mengder og utslipp fra byggefase, enn mange av de øvrige komponentene.

Til tross for at usikkerheten er relativt stor, er det imidlertid tydelig at alle konseptene som er utredet i alternativanalysen i KVU 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 ca. 3 år eller mindre fra idriftsettelse (med unntak av Raumabanen). Det innebærer at utslippene fra utbygging og vedlikehold må være minst 30 ganger større enn beregningene viser, for at konseptene ikke skal medføre en netto reduksjon i klimagassutslipp over beregningsperioden på 75 år. Dette vurderes som svært usannsynlig.

## 6 Referanser

Ballard Power Systems Inc., FUEL CELL LIFE CYCLE ASSESSMENT: FCmove-HD (Technical Note), [Our Sustainability | Global Clean Energy Solutions | Ballard Power, technical-note- -fuel-cell-life-cycle-assessment-web.pdf \(ballard.com\)](#), hentet 2023-07-03.

Fan, Z., Sheerazi, H., Bharwaj, A., Corbeau, A., Longobardi, K., Vidal, A. C., Merz, A., Woodal, C. M., Agrawal, M., Friedmann, J. (2022). Hydrogen Leakage: A potential Risk for the Hydrogen Economy. *Center on Global Energy Policy*. Hentet fra: [Hydrogen Leakage: A Potential Risk for the Hydrogen Economy - Center on Global Energy Policy at Columbia University SIPA | CGEP](#)

IVL Swedish Environmental Research Institute. (2017). *The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries*. IVL publikasjon nr. C243.

IVL Swedish Environmental Research Institute. (2019). *Lithium-Ion Vehicle Battery Production - Status 2019 on Energy Use, CO2 Emissions, Use of Metals, Products Environmental Footprint, and Recycling*. IVL publikasjon nr. C444.

Menon. (2022). *Indirekte utslipp og eksterne kostnader i transportsektorens bygg- og anleggsfase*. Menon-publikasjon nr. 20.

Mohr, M., Peters, J.F., Baumann, M., and Weil, M. (2020). Toward a cell-chemistry specific life cycle assessment of lithium-ion battery recycling processes. *Journal of Industrial Ecology* 24(6): 1310-1322

Sand, M., Skeie, R. B., Sandstad, M., Krishnan, S., Myhre, G. (2023). A multi-model assessment of the Global Warming Potential of hydrogen. *Communications Earth & Environment* 1(4): 203. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00857-8>

Tidligfaseverktøyet. (v.6 2022). Utgiver: Bane NOR/Jernbanedirektoratet.

Usai, L., Hung, R. C., Vasques, F., Windsheimer, M., Burheim, O. S., Strømman, A. H. (2021). Life cycle assessment of fuel cell systems for light duty vehicles, current state-of-the-art and future impacts. *Journal of Cleaner Production* 280 (2). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125086>