

Jernbanealliansen

LCA AV GODSTRANSPORT BANE OG VEG

Rapporten presenterer klimagassutslipp for to scenarioer av godstransport via bane og veg mellom Alnabru og Bergen for perioden 2020 til 2050.

Dato: 26.04.2021

Versjon: 06



Dokumentinformasjon

Oppdragsgiver:	Jernbanealliansen
Tittel på rapport:	LCA av godstransport
Oppdragsnavn:	Godstransport via bane og veg
Oppdragsnummer:	630454-01
Utarbeidet av:	Linda Ager-Wick Ellingsen og Kristine Bjordal
Oppdragsleder:	Kristine Bjordal
Tilgjengelighet:	Åpen

Kort sammendrag

I denne rapporten presenter Asplan Viak resultatene fra et LCA-studie av godstransport via bane og veg mellom godsterminalene i Alnabru og Bergen. To ulike scenario er analysert over en tidsperiode fra 2020 til 2050. Rapporten inneholder en overordnet beskrivelse av metodikk og forutsetninger som ligger til grunn for analysen, som skal gi en større forståelse av LCA-studiet og sikre at bruksmulighetene blir mest mulig optimale. LCA-studiet betrakter klimagassutslipp i et vugge-til-grav perspektiv, og både direkte og indirekte utslipp er inkludert. Scenario 1 med tiltaket 50% økt godsoverføring på bane oppnådde høyest klimabesparelse med totalt -0,31 millioner tonn CO₂-ekv. for hele tidsperioden. Scenario 2 med 100% godsoverføring fra bane til veg ble ikke et klimabesparende tiltak, og de totale klimagassutslippene ble 0,65 millioner tonn CO₂-ekv. høyere for hele tidsperspektivet. Gitt de forutsetningene som lå til grunn i analysen fremgår det av studiet at godsoverføring til bane er et tiltak som bidrar til betydelig reduksjon av klimagassutslipp for godstransport mellom Alnabru og Bergen.

06	26.4.2021	LCA av godstransport	KB	
05	22.4.2021	LCA av godstransport	KB	
04	21.4.2021	LCA av godstransport	KB	
03	20.4.2021	LCA av godstransport	KB	
02	14.4.2021	LCA av godstransport	KB	
01	22.03.21	LCA av godstransport	KB	CS
VERSJON	DATO	BESKRIVELSE	UTARBEIDET AV	KS

Forord

Denne rapporten er utarbeidet av Asplan Viak på oppdrag for Jernbanealliansen. Oppdragsgiver ønsket å fremskaffe ny kunnskap som kan ha falt utenfor teknologiutvalgets analyse av klima- og miljøeffekter av godsoverføringsmålet. Asplan Viak har av den grunn utført livsløpsvurderinger knyttet til godstransport via vei og bane på strekningen Alnabru-Bergen for å dokumentere klimaeffekter og klimagassutslipp ved ulike alternative godsoverføringsalternativer.

Prosjektet har blitt gjennomført av miljøsystemanalytiker Phd Linda Ager-Wick Ellingsen og sivilingeniør Master Kristine Bjordal. Fagsjef miljøanalyse og -ledelse Christian Solli har vært kvalitetssikrer for denne rapporten. Styremedlem i Jernbanealliansen og fagsjef i Naturvernforbundet, Holger Schlaupitz, har vært behjelpelig med å fremskaffe underlagsdata. Kontaktpersonen i Jernbanealliansen var leder Tonje E. Orsten Kristiansen.

Trondheim, 20.04.2021

Kristine Bjordal
Oppdragsleder

Christian Solli
Kvalitetssikrer

Innhold

1. INTRODUKSJON	7
2. METODE	8
2.1. Livsløpsvurdering	8
2.2. Beskrivelse av LCA-studiet	9
2.2.1. Scenario 1 – godsoverføring til bane	10
2.2.2. Scenario 2 – godsoverføring til veg.....	10
2.3. Modellering av veg	10
2.3.1. Lastebilsflåten	10
2.3.2. Energibruk (MJ/tkm).....	11
2.3.3. Spesifikasjon av brenselceller og Li-ion batteripakker	12
2.3.4. Estimering av klimagassutslipp fra kjøretøy	13
2.3.5. Vegstrekningen	15
2.4. Modellering av bane	15
2.4.1. Godstog.....	16
2.4.2. Energibruk.....	16
2.4.3. Jernbanestrekningen	16
2.4.4. Godsterminalene	17
2.4.5. Estimering av klimagassutslipp for godstog og jernbanen	17
3. RESULTATER	19
3.1. Overordnede resultater	19
3.2. Scenario 1 – overføring til bane.....	20
3.2.1. Bane	21
3.2.2. Veg	22
3.3. Scenario 2 – godsoverføring til veg.....	23
3.3.1. Bane	24
3.3.2. Veg	25
4. DISKUSJON	27
4.1. Tidsperspektiv.....	27
4.2. Scenario 1 – overføring til bane.....	27
4.3. Scenario 2 – godsoverføring til veg.....	28
5. KONKLUSJON	29

KILDER.....	30
VEDLEGG A	33
VEDLEGG B	36
VEDLEGG C	37
VEDLEGG D	38
VEDLEGG E.....	39
VEDLEGG F.....	40
VEDLEGG G	41
VEDLEGG H	42
VEDLEGG I	49

1. INTRODUKSJON

Norske og europeiske myndigheter har et mål om å overføre godstransport fra vei til sjø og bane. Klimaeffektene av dette er synliggjort i flere analyser, men de begrenser seg som regel til utslipp fra transportmidlenes energiforbruk. Jernbanealliansen ønsker å fremskaffe ny kunnskap om klimaeffekten av godsoverføring mellom vei og bane ved å ta inn både direkte og indirekte utslipp i analysen i en såkalt livsløpsanalyse. Asplan Viak har av den grunn utført livsløpsvurderinger (LCA) knyttet til godstransport via vei og bane på strekningen fra Alnabru i Oslo til Bergen for å dokumentere klimagassutslipp ved ulike alternative godsoverføringsalternativer. For å få et fullstendig bilde av klimagassutslippene er både direkte og indirekte utslipp inkludert. De indirekte utslippene omfatter utslipp knyttet til infrastruktur (bygging, drift og vedlikehold), kjøretøy (produksjon, drift og vedlikehold), og drivstoff/elektrisitet (produksjon og distribusjon), mens de direkte utslippene omfatter forbrenning av drivstoff.

I LCA-studiet gjør vi beregninger for godstransport i to alternative scenarioer fra 2020 til 2050, og tiltak trer i kraft fra og med 2026:

- Scenario 1 – godsoverføring til bane: Her vurderes kjente godstiltak på bane og det legges inn økt godstransport på bane tilsvarende denne kapasitetsveksten.
Scenario 2 – godsoverføring til veg: Her vurderes endringene i miljøbelastning av at gods på bane legges ned, og at veinettet tar over dagens godsvolum på tog.

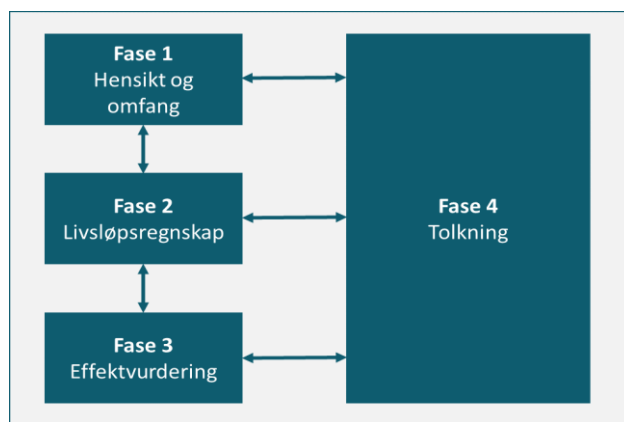
I denne rapporten vil kapittel 2, «Metode», gi en kort beskrivelse av metoden Livsløpsvurdering, etterfulgt av en beskrivelse av det aktuelle LCA-studiet for godstransport og forutsetningene for modelleringen for godstransport via veg og bane. I kapittel 3 presenteres resultatene av analysearbeidet både overordnet og detaljert for de tre scenarioene. I kapittel 4 følger våre kvalitative vurderinger knyttet til resultatene og begrensinger som følge av antagelser og andre usikkerheter. Rapporten avsluttes med en overordnet konklusjon som synliggjør hovedfunnet i LCA-studiet.

2. METODE

I dette kapittelet presenteres metoden og en beskrivelse av den aktuelle casestudien, samt en beskrivelse av hvordan modelleringen er gjort for henholdsvis veg og bane.

2.1. Livsløpsvurdering

Utrekning av klimagassutslipp i denne rapporten ble gjort etter LCA-metoden. LCA er forkortelse for det engelske navnet på metoden, «life cycle assessment», som på norsk gjerne omtales som livsløpsvurdering. LCA er en ISO-standardisert metode for å beregne miljøbelastningen til et produkt eller en tjeneste gjennom hele dets livsløp; fra råvareutvinning, produksjon, transport, bruksfase og avhending. Miljøbelastningen kan beregnes for hele eller deler av livsløpet, f.eks. fra «vugge til (fabrikk)port» eller «vugge til grav». I en LCA kan flere miljøbelastningskategorier beregnes, deriblant global oppvarming, toksisitet, forsurening, overgjødning, nedbrytning av ozonlaget.



Figur 1 Faser i et LCA-studie.

LCA-metoden tilbyr et systematisk rammeverk og prosess for å beregne miljøbelastninger som oppstår i ulike produkters eller tjenesters verdikjeder. EU-kommisjonen beskriver blant annet LCA som «det beste tilgjengelige rammeverket for å vurdere produkters potensielle miljøbelastninger» (Hellweg and Milà i Canals, 2014).

Som vist i Figur 1 består LCA-metoden av fire faser: 1 – hensikt og omfang, 2 – livsløpsregnskap, 3 – effektvurdering og 4-tolkning. Ettersom LCA er en iterativ prosess, gjentas disse fasene flere ganger i løpet av en studie.

Første fase, hensikt og omfang, inkluderer definering av problemstillinger og bestemmelse av systemgrenser. I denne fasen blir systemgrensen og den funksjonelle enheten bestemt. Systemgrensen setter begrensninger for prosessene og aktivitetene som inkluderes i studien. Bestemmelsen av den funksjonelle enheten er mindre kritisk i selvstendige studier, men for sammenlikningsstudier vil denne utgjøre grunnlaget for sammenlikningen og er dermed kritisk for å gjennomføre en rettferdig analyse mellom to eller flere alternativer. Den funksjonelle enheten skal være representativ for funksjonen til prosessen eller produktet som studeres (Baumann og Tillmann, 2004).

I andre fase, livsløpsregnskap, blir inventaret samlet. Et flytskjema som beskriver systemet som modelleres bør lages, og data for input og output av hver prosess i livsløpet samles inn. Datainnsamlingen er den mest tidskrevende steget i en LCA (Rebitzer *et al.*, 2004). Denne fasen beregner også miljøpåvirkningen til systemet iht. den funksjonelle enheten (Baumann and Tillmann, 2004).

I tredje fase, effektvurdering, grupperes utslipp og ressursuttak i henhold til hvilken type miljøpåvirkning de bidrar til. Dette steget bruker karakteriserings faktorer for å konvertere utslipp til vanlige miljøpåvirkningsenheter for ulike kategorier (Hellweg and Milà i Canals, 2014). I denne studien fokuserer vi på global oppvarmings potensial, GWP, uttrykt ved kilogram karbondioksid ekvivalenter (kg CO₂-ekv.) og tonn karbondioksid ekvivalenter (tonn CO₂-ekv.).

Siste fase i en LCA er tolkning, som består av to prosesser. Første prosess inkluderer analyse og fremstilling av resultatene, og andre prosess er evalueringen av resultatene for å etablere tillit til resultatene. I en LCA er kvaliteten og usikkerheten av dataen vurdert kontinuerlig.

Selv om de fire fasene er presentert i en sekvensiell rekkefølge er LCA i praksis en iterativ prosess. Som vist i Figur 1 er de fire fasene sammenhengende. Den iterative prosessen i LCA tillater tilpasning og justering av tidligere steg som følge av funn gjort i senere faser. For eksempel, hvis en i siste fase (tolkning) finner ut at den definerte funksjonelle enheten ikke var tilfredsstillende, kan man gå tilbake til første fase (hensikt og omfang) og definere en ny funksjonell enhet. I dette eksempelet følger det det at fase to til fire da også må gjentas. Flere interaksjoner kan være nødvendige i løpet av en LCA studie.

2.2. Beskrivelse av LCA-studiet

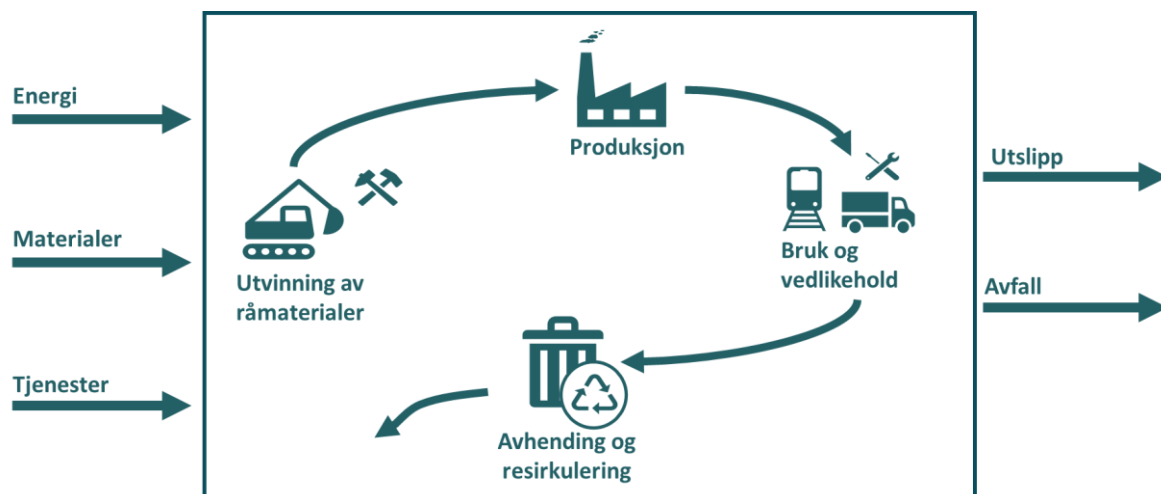
Strekningen Alnabru–Bergen er en sentral strekning for godsoverføring mellom Norges to største byer, Oslo og Bergen. I analysen er det tatt utgangspunkt i at det i gjennomsnitt for 2015-2017 ble transportert 2 019 801 tonn gods mellom byene via bane og veg, der 701 424 tonn fraktes via veg og 1 318 377 tonn via bane. Dette er basert på grunnlagsdata levert fra Jernbanedirektoratet som igjen er basert på SSBs lastebilundesøkelse, havnestatistikk og informasjon fra jernbaneselskapene. Dataen var brukt som et underlag til figur 8 i rapporten «Jernbanen mot 2050» (Jernbanedirektoratet, 2020a), og dette datagrunnlaget har noen begrensninger knyttet hva som er inkludert. Godsmengden som transporteres via veg inkluderer alt som sendes mellom Akershus/Oslo og Hordaland, altså også gods som transporteres til steder som har start- og/eller endepunkt et stykke unna jernbanen. Samtidig er ikke gods på veg som har start- eller endepunkt i Hordaland og som skal til eller kommer fra andre deler av landet eller i utlandet med i tallet. Også en del av dette godset kan det være aktuelt å flytte fra vei til bane mellom Oslo og Bergen.

Studien tar utgangspunkt i godsmengdene i 2015–2017 og forutsetter at godsvolumet som da gikk med tog, representerer det praktiske kapasitetstaket for dagens baneinfrastruktur inkludert terminaler uten tiltak, gitt at persontrafikktilbudet på banen også skal utvides i tråd med avtalen mellom Jernbanedirektoratet og Vy. Sannsynligvis er det noe restkapasitet, men vi har ikke forsøkt å estimere denne og ser derfor bort ifra det. Studiene ser på endringer i transportmiddelfordelingen mellom bane og veg frem til 2050 og teknologisk utvikling for begge transportformene.

Dette LCA-studiet undersøker utviklingen av de årlige klimaeffektene for godstransport som følge av alternative fordelinger av godsoverføring via bane og vei. I studiet analyseres to ulike scenarier for godstransport via jernbane og veg på den aktuelle strekningen. Det er endringene mellom scenarioene som utgjør sluttresultatet, og tidshorisonten som modelleres er 2020 til 2050. Tidsperioden er delt inn i en kort- og langtidshorisont, da grunnlagsdata og antagelser i beregningene innehar forskjellig grad av usikkerhet. Korttidshorisont utgjør 2020 til 2035, og lang tidshorisont utgjør tidsperioden fra 2035 til 2050. Følgende scenarier er modellert, og detaljerte beskrivelser av antagelsene er gitt i delkapittelet under:

- Scenario 1 – godsoverføring til bane
- Scenario 2 – godsoverføring til veg

LCA-studiet betrakter klimagassutslipp i et vugge-til-grav perspektiv, som illustrert i Figur 2. Dette medfører at analysen inkluderer prosessene utvinning av råmaterialer, produksjon, transport, bruk, vedlikehold og avhending og resirkulering. For å få et komplett bilde av klimagassutslippene er både direkte og indirekte utslipp inkludert. De indirekte utslippene omfatter utslipp knyttet til infrastruktur (bygging, drift og vedlikehold), kjøretøy (produksjon, drift og vedlikehold), og drivstoff/elektrisitet (produksjon og distribusjon), mens de direkte utslippene omfatter forbrenning av drivstoff.



Figur 2 Illustrasjon av LCA-studiets omfang, som ble gjort fra vugge-til-grav.

2.2.1. Scenario 1 – godsoverføring til bane

Scenario 1 betrakter en 50% økning av godstransport på bane som følge av utbygging frem mot 2025. Frem til og med 2025 antas det at den årlige godstransporten vil ligge konstant på 1,3 millioner tonn via bane, og at økningen trer i kraft fra 2026. Tiltaket fører til at den årlige godstransporten via veg reduseres med 0,66 millioner tonn. Scenarioet betrakter klimagassutslipp knyttet til omlegging fra 450 m til 620 m godstog, og nødvendig utbygging av kryssingsspor og godsterminaler i Bergen og på Alnabru.

2.2.2. Scenario 2 – godsoverføring til veg

Scenario 2 betrakter en 100% godsoverføring fra bane til veg fra og med 2026. I dette scenariet vil det årlig transporteres 1,3 millioner tonn via bane frem til og med 2025, men ikke noe fra og med 2026. Dette medfører at den årlige transportmengden på veg øker med 1,3 millioner tonn fra og med 2026. Beregningene betrakter ikke hvorvidt ny utbygging av veginfrastruktur vil være nødvendig som følge av økte godstransport via veg. Potensielle utslipp knyttet til ny veg konstruksjon, drift, vedlikehold og avhending er ikke inkludert. For bane vil ikke nye typer togsett tas i bruk, og ingen ny baneinfrastruktur vil bygges frem til 2026.

2.3. Modellering av veg

Denne seksjonen gir en oversikt over data brukt i analysen av kjøretøyene og vegstrekningen. På den gitte strekningen har vi antatt at det kjøres tunge lastebiler med totalvekt på 40 og 60 tonn. Del-seksjon 2.3.1 går gjennom modelleringen av lastebilsflåten, 2.3.2 viser estimert energibruk for de ulike lastebilstypene, 2.3.3 gir en oversikt over brenselcelle- og batterispesifikasjoner for hydrogen- og batterilastebilene og 2.3.4 går gjennom utslippsberegninger for de ulike kjøretøyene.

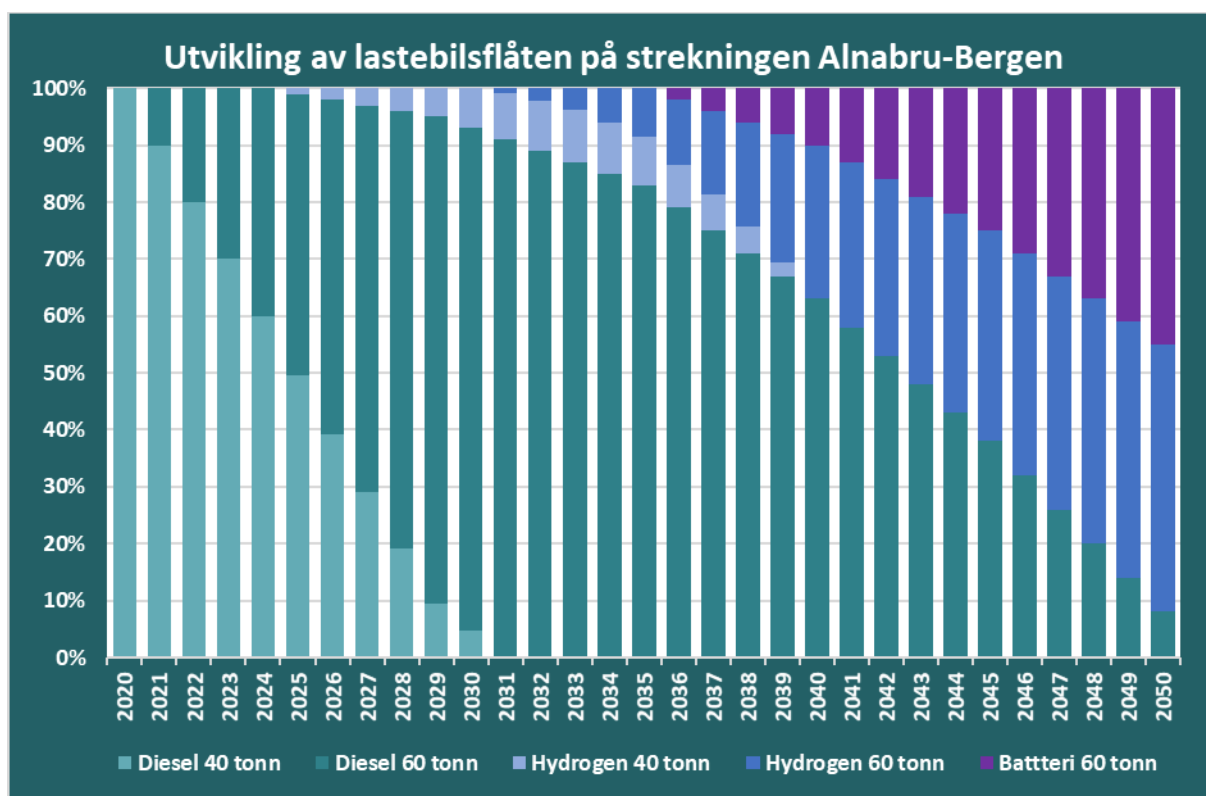
I denne studien er ordet lastebil brukt om fagterminologien vogntog.

2.3.1. Lastebilsflåten

Sammensetningen og utviklingen av lastebilsflåten er forventet å endre seg, både med tanke på kjøretøystørrelse og teknologi. Modelleringen av lastebilsflåten er gjort spesifikt for den vurderte strekning på 471 km, og er basert på to hovedantagelser. For det første er det antatt at det skjer en rask overgang til modulvogntog (altså 60-tonns lastebiler) på strekningen som følge av dette er tillatt og mer kostnadseffektivt enn vanlige lastebiler. For det andre er det gjort en vurdering av

utviklingen av bruken av brenselceller- og batteriteknologi basert på hva som finnes i dag, og hva som er planlagt for tungtransport og batteriutvikling fremover i tid.

Figur 3 viser antatt utvikling og sammensetning av lastebilsflåten på strekningen. For dieseldrevne kjøretøy har vi antatt at 60-tonns lastebiler vil ta over for 40-tonns lastebiler frem mot 2030, og at 60-tonns dieseldrevne lastebiler på lang sikt (mot 2050) vil bli byttet ut av hydrogen- og batterielektriske kjøretøy. I første omgang, fra 2025, vil 40-tonns hydrogenkjøretøy bli faset inn. Med videre teknologiutvikling vil 60-tonns hydrogenkjøretøy bli faset inn fra 2031. Etter hvert vil 60-tonns hydrogenkjøretøy ta over fremfor 40-tonns hydrogenkjøretøy. Fra 2036 fases også batterielektriske 60-tonns lastebiler inn. For å kunne konkurrere med diesel- og hydrogenlastebiler når det gjelder lastekapasitet, ble ikke 40-tonns batterielektriske lastebiler vurdert som relevante for denne strekningen.



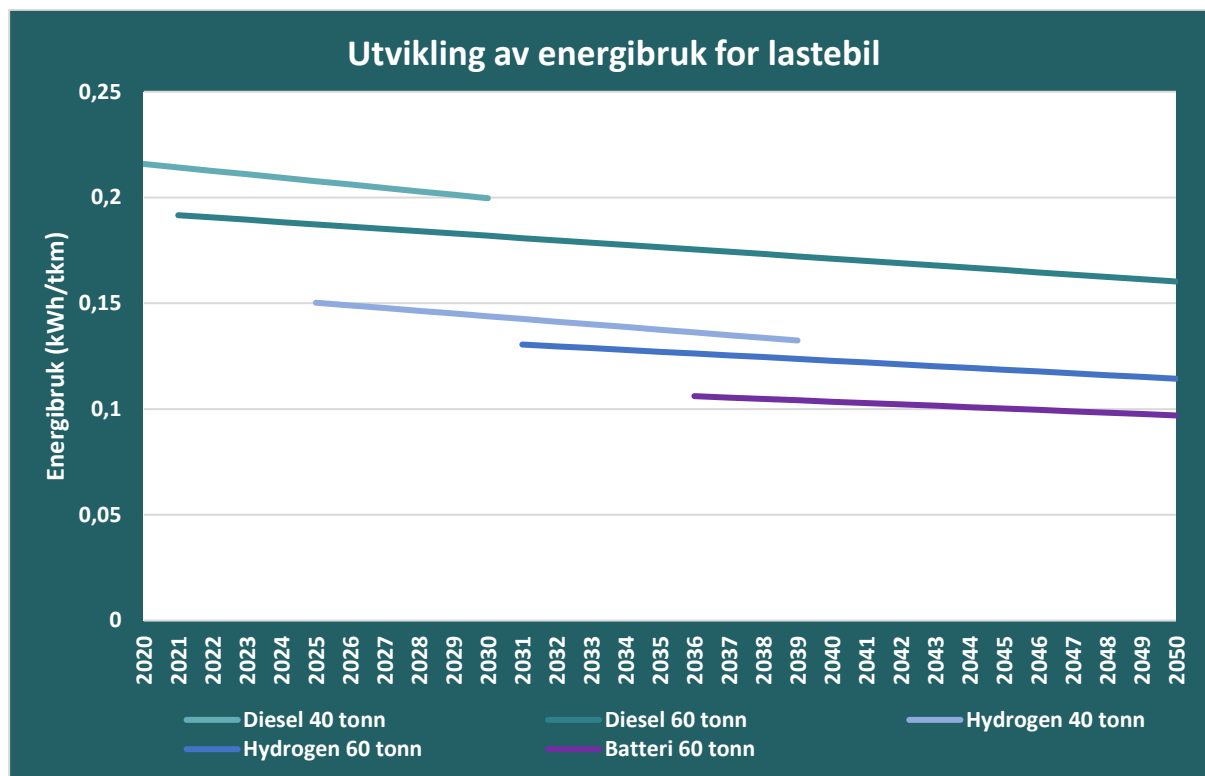
Figur 3 Utvikling av lastebilsflåten på strekningen Alnabru-Bergen.

2.3.2. Energibruk (MJ/tkm)

For hver av de forskjellige lastebilstypene har vi estimert energibruk per tonnkilometer (MJ/tkm). Vedlegg D gir en detaljert beskrivelse av fremgangsmåten for estimering av MJ/tkm, mens teksten under gir en kort beskrivelse og presenterer resultatet.

Beregningene for kjøretøyenes energibruk tar utgangspunkt i dieselbruk (l/100km) for diesellastebiler og deres lastekapasitet. Basert på ulike faktorer har vi beregnet energibruk for hydrogen- og batterilastebiler, og reduksjon av diesel- og energibruk frem mot 2050.

Utviklingen av energibruk oppgitt i kWh per tkm for de forskjellige lastbilstypene for aktuelle tidsrom er vist i Figur 4.



Figur 4 Utvikling av energibruk målt i kWh/tkm.

2.3.3. Spesifikasjon av brenselceller og Li-ion batteripakker

For de elektriske lastebilene spesifiserte vi størrelse på brenselceller og Li-ion batteripakker.

Basert på eksisterende/kommende hydrogenlastebiler har vi estimert størrelsen (kW) på brenselcellene for 40-tonns lastebilen, og skalert opp for 60-tonns lastebilen. Brenselcellesystemene som brukes i lastebiler består av selve brenselcellene (proton exchange membrane fuel cells; PEMFC), hjelpesystemer og hydrogentanker. Ettersom brenselceller opererer best under konstant belastning trenger hydrogenlastebilene også et Li-ion batteri, størrelsen på disse ble estimert ved å bruke samme fremgangsmåte som estimeringen av størrelsen på brenselcellesystemene.

Basert på estimert energibruk per km (MJ/km) har vi estimert størrelsen for Li-ion batteriet for 60-tonns lastebilen. Li-ion batteripakker kan grovt sett inndeles i battericeller og andre batterikomponenter, som for eksempel innpakning og styringssystemer.

Spesifikasjoner av brenselceller og Li-ion batterier er oppsummert i Tabell 1.

Tabell 1 Oppsummering av utvalgte spesifikasjoner

Spesifikasjon	Hydrogenlastebiler		Batterilastebil
	40-tonns	60-tonns	60-tonns
Brenselcelle (kW)	190	285	
Li-ion batteri (kWh)	73	110	863

2.3.4. Estimering av klimagassutslipp fra kjøretøy

I denne seksjonen gjennomgås beregninger av utslipp knyttet til kjøretøy. Først gjennomgås utslippsberegning for produksjon, avhending og vedlikehold, deretter bruk.

2.3.4.1. Produksjon, vedlikehold og avhending

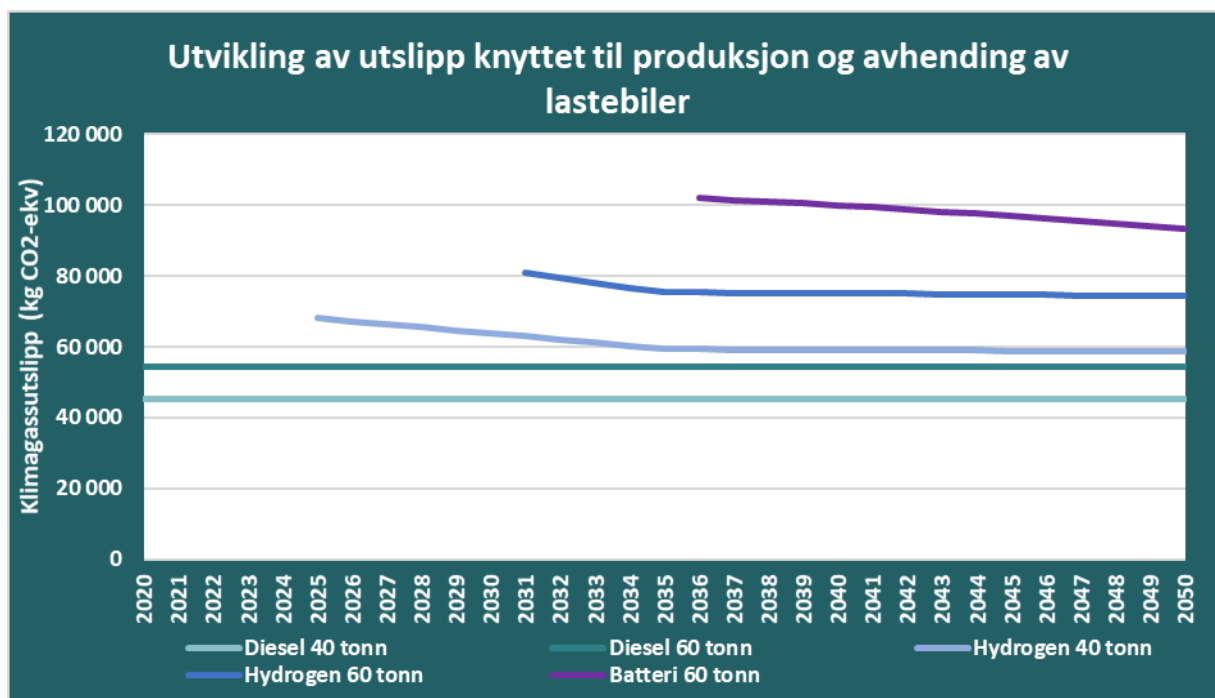
Klimagassutslipp knyttet til produksjon, vedlikehold og avhending av en 40-tonns lastebil er basert på prosesser fra LCA-databasen *ecoinvent*. For produksjon og avhending av en 40-tonns lastebil har vi derfor antatt 45 tonn CO₂-ekv.

For å beregne klimagassutslipp knyttet til produksjon, vedlikehold og avhending av 60-tonns modulvogntog har vi antatt at disse er 20% høyere enn for 40-tonns lastebiler. Merk at det er stor usikkerhet knyttet til hvordan disse utslippene skaleres opp. Det ble lagt til grunn at utslippene ikke skaleres lineært med vekten, men at den øker med en mindre andel enn vektforskjellen ettersom det er større utslipp knyttet til førerhuset enn vognene.

Elektriske kjøretøy som går på enten hydrogen eller strøm har antatt samme utslipp knyttet til selve kjøretøyet, men har i tillegg utslipp knyttet til brenselcellesystemet og batteriene. Merk at ikke ble gjort noen justeringer for motortype eller andre forskjeller i drivverket da detaljnivået i *ecoinvent*-prosessen for lastebilen ikke gir denne type detaljnivå. Det innebærer at produksjons og avhendingsutslipp fra *ecoinvent* 3.5 på 45 tonn CO₂-ekv. ble antatt for selve lastebilen og så har vi lagt til utslipp knyttet til brenselcellesystemet og batteriene. Estimering av utslipp knyttet til produksjon og avhending av brenselcellesystemer og Li-ion batterier er beskrevet i detalj i vedlegget, mens teksten under gir en kort oppsummering og oversikt av estimer.

Utslipp knyttet til brenselcellesystemer er basert på ulike LCA-studier (Dér *et al.*, 2018; Usai *et al.*, 2021) og *ecoinvent* 3.5. Utslipp knyttet til Li-ion batterier er basert på data fra LCA-studier av Li-ion batterier (Ellingsen *et al.*, 2014; Ellingsen, Singh and Strømman, 2016; Ellingsen, Hung and Strømman, 2017; Ellingsen, 2020) og *ecoinvent* 3.5. Både for brenselcellene og Li-ion batteriene antok vi at de hadde samme levetid som lastebilene og det derfor ikke var nødvendig med bytte av disse.

Figur 5 viser beregnet utvikling av utslipp knyttet til produksjon og avhending av lastebiler.



Figur 5 Utvikling av utslipp knyttet til produksjon og avhending av lastebiler.

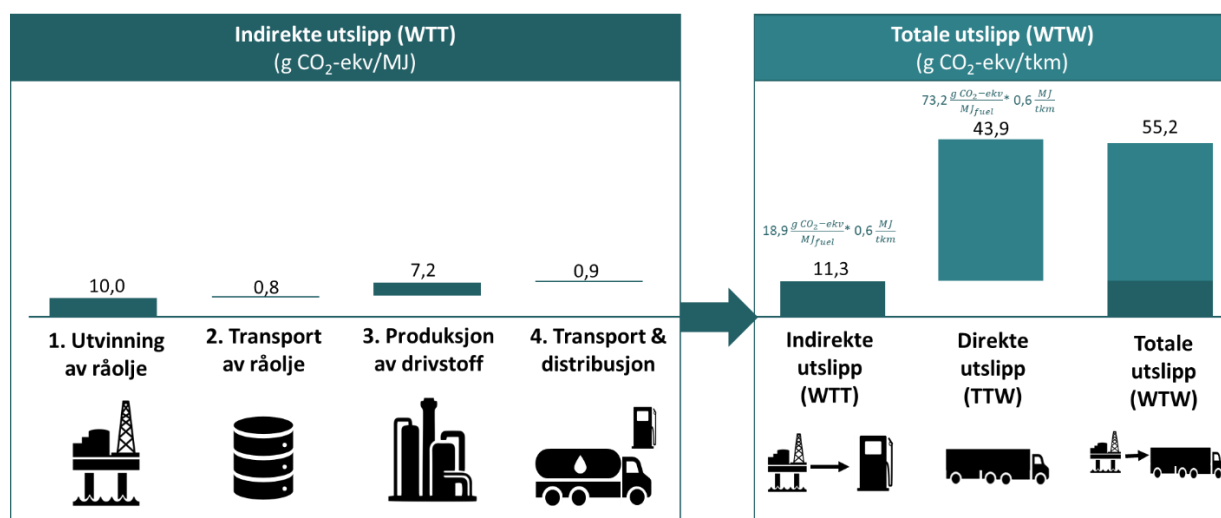
For vedlikehold av lastebilen justerte vi *ecoinvent*-prosessen som modellerer vedlikehold av fossile 40-tonns lastebiler. For 40-tonns diesellastebilen endret vi strømmiks til norsk strøm, det resulterte i et utslipp på nærmere 17 tonn CO₂-ekv. Merk at dette gjelder vedlikehold gjennom hele kjøretøyets livsløp. For 60-tonns diesellastebilen antok vi 20% høyere utslipp, altså 20 tonn CO₂-ekv. For elektriske 40-tonns lastebiler endret vi strømmiks til norsk strøm og tok bort ta bort uaktuelle input (for eksempel bytte av blybatteri). Vi fikk da et utslipp på nærmere 15 tonn CO₂-ekv. for en 40-tonns lastebil. Også her har vi antatt at vedlikeholdsutslipp av 60-tonns modulvogntog er 20% høyere enn for 40-tonns lastebiler, altså 18 tonn CO₂-ekv.

Utslipp knyttet til produksjon, vedlikehold og avhending er distribuert over hele kjøretøyets levetid, som er antatt å være 10 år.

2.3.4.2. Bruk

Basert på energibruk (MJ/tkm) og utslippsfaktorer for energibærerne (kg CO₂-ekv./MJ) beregnet vi utslipp knyttet til bruk av lastebilene. Utslippsberegningene baserer seg på det såkalte «well-to-wheel» (WTW) prinsippet, der utslipp beregnes fra «well-to-tank» (WTT) og fra «tank-to-wheel» (TTW). WTT-utslipp er indirekte utslipp som skjer oppstrøms av bruk i lastebil, mens TTW-utslipp er direkte utslipp som skjer ved bruk av lastebil. Diesellastebiler har dermed både indirekte (WTT) og direkte (TTW) utslipp, mens elektriske lastebiler som bruker strøm eller hydrogen kun har indirekte utslipp (WTT).

Figur 6 illustrerer fremgangsmåten for beregning av utslipp knyttet til bruk av en diesellastebil og inkluderer et eksempel.



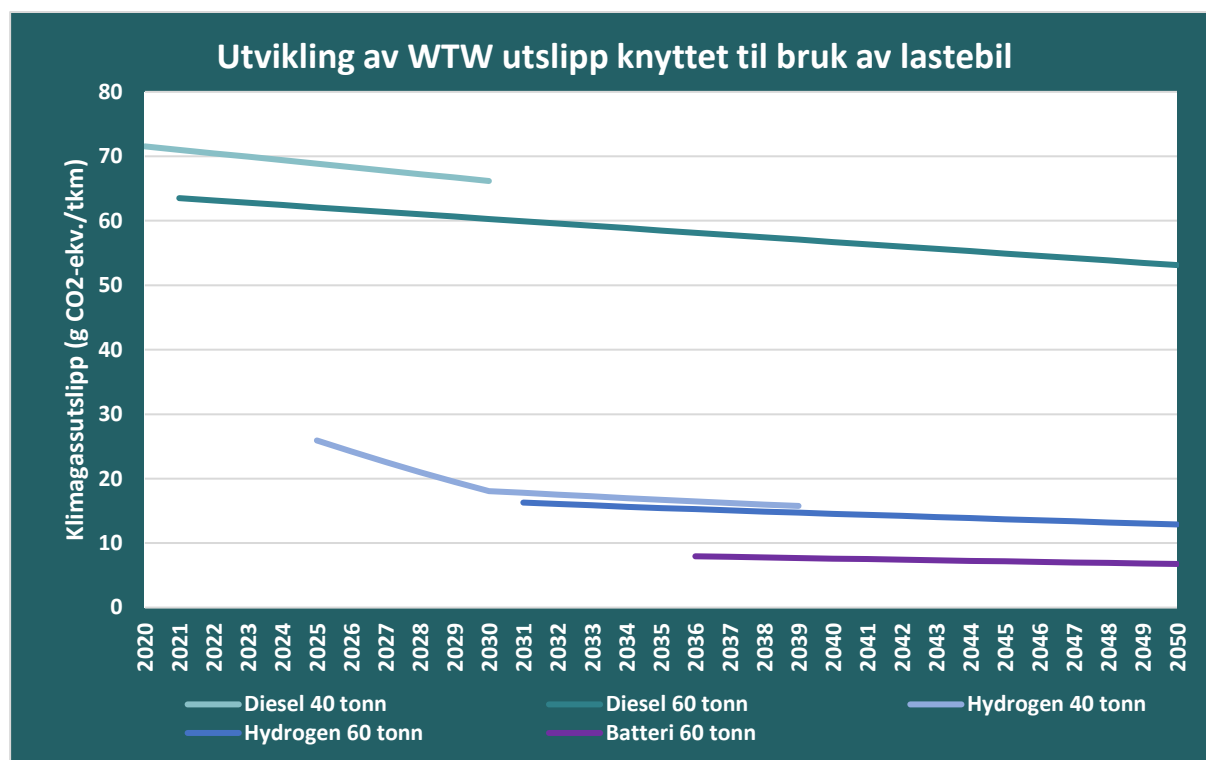
Figur 6 Illustrasjon av fremgangsmåte og eksempel for beregning av indirekte og direkte utslipp (WTW) knyttet til bruk av en diesellastebil.

Venstre side av figuren viser utregning av WTT-faktor for diesel, totalt er denne på 18,9 g CO₂-ekv./MJ. Høyre side av figuren viser utregning av WTW utslipp, der WTT-faktoren (18,9 g CO₂-ekv./MJ) multipliseres med energibruk (0,6 MJ/tkm) og utslippsfaktoren for dieselforbrenning (73,2 g CO₂-ekv./MJ) multipliseres med energibruk (0,6 MJ/tkm). Ved å legge sammen WTT-utslipp på 11,3 g CO₂-ekv./tkm og TTW-utslipp 43,9 g CO₂-ekv./tkm får vi WTW-utslipp på 55,2 g CO₂-ekv.

Merk at samme fremgangsmåte brukes for beregning av utslipp knyttet til bruk av hydrogen- og batterilastebiler, men for disse er WTT-utslipp og WTW-utslipp like ettersom de ikke har TTW-utslipp fra forbrenning av drivstoff. Overnevnte utslippsfaktorer (WTT på 18,9 g CO₂-ekv./MJ og forbrenning på 73,2 g CO₂-ekv./MJ) for diesel ble brukt i analysen og baserer seg på JEC-konsortiets WTW V5 rapport (Prussi *et al.*, 2020). Detaljert beskrivelse av beregning av utslippsfaktor for komprimert hydrogen (350 bar) som brukes i hydrogenlastebilene er gitt i Vedlegg E. Utregningen baserer seg på produksjon av hydrogen med nordisk lavspent strøm i elektrolyseprosessen og kompresjonen. WTT-

utslippsfaktor på komprimert hydrogen ble beregnet til å ligge på 45,0 g CO₂-ekv./MJ i 2026 (se Vedleggsfigur 3 for detaljer). Detaljert beskrivelse av beregning av utslippsfaktor for nordisk strøm bruk til opplading av batterier er gitt i Vedlegg F. Utrekningen baserer seg i grove trekk på NVEs estimater av nordisk strømproduksjon frem mot 2040 (NVE, 2019).

Figur 7 viser utvikling av WTW-utslipp knyttet til bruk av de ulike lastebilstypene.



Figur 7 Utvikling av WTW-utslipp knyttet til bruk av lastebilene.

2.3.5. Vegstrekningen

Klimagassutslipp knyttet til konstruksjon, vedlikehold, drift og avhending er basert på prosesser fra LCA-databasen *ecoinvent* 3.5. Prosessene ble modifisert for norske forhold ved å endre strømmiksen til norsk strøm. Utslipp knyttet til veg er estimert på en kontinuerlig basis og er beregnet per tkm i henhold til prosesser og anbefalinger i databasen. Konstruksjon og avhending av veg har et samlet utslipp på 4,5 g CO₂-ekv./tkm, mens vedlikehold og drift har samlet utslipp på 0,1 g CO₂-ekv./tkm.

Merk at beregningene ikke betrakter hvorvidt mer eller mindre konstruksjon, drift, vedlikehold og avhending blir nødvendig som en konsekvens av at tyngre og lengre modulvogntog (sammenlignet med lettere og kortere lastebiler) benyttes på vegstrekningen. Vedlegg G gir en beskrivelse av hva som kunne vært tilfellet ved behov for mer vegkonstruksjon.

Utslipp knyttet til fylle- og ladestasjoner ble ikke betraktet i analysen.

2.4. Modellering av bane

Denne seksjonen gir en oversikt over data brukt i analysen av lokomotiv, vogntog og jernbanestrekningen. På den aktuelle strekningen har vi antatt at det i dagens situasjon kjører godstog som er 450 m lange, og at dette endres til 620 m godstog. Del-seksjon 2.4.1 går gjennom modelleringen av godstogene, 2.4.3 og 2.4.4 gir en oversikt over antagelsene knyttet til jernbanestrekningen og godsterminalene. Del-seksjon 2.4.5 gir en beskrivelse av utslippsberegningene for jernbanen.

2.4.1. Godstog

Godstogene er hovedsakelig forventet å endre seg med tanke på lengde og vekt. Modelleringen av godstogene er gjort spesifikt for den vurderte strekning Alnabru-Bergen på 460 km. For godstogene har vi antatt at dagens godstog er 450 m, og etter utbygging av kryssingsspor på jernbanen mellom 2022 og 2025 antar vi en fullstendig overgang til 620 m lange godstog i 2026, som brukes ut 2050.

Vi forutsetter at togene har en levetid på 40 år. Basert på opplysninger fra Jernbanedirektoratet (2019) legger vi til grunn at lokomotivet er 20 m langt og vognene er 34,5 m lange og har plass til 4 transportenheter tilsvarende en 20 fots container (såkalt TEU). Samme kilde oppgir at vognene veier 35,5 tonn og TEU-ene 2,3 tonn uten last og forutsetter at det i gjennomsnitt er 9,2 tonn last i hvert TEU. Et 450 m langt godstog vil da ha plass til 50 TEU, mens tog på 620 m har plass til 68 TEU. Videre forutsetter vi at en tredel av enhetene består semihengere, og at deres egenvekt målt per TEU er på det dobbelte av en vanlig container, men frakter like mye gods. Som grunnlag for å regne energiforbruket må vi i tillegg legge til lokomotivenes egenvekt, som er på 85 tonn for korte godstog og 120 tonn for lange godstog. I sum tilsier dette at 450 m lange godstog veier 1141 tonn inkludert lokomotiv og frakter 460 tonn gods. 620 m lange godstog veier da 1558 tonn inkludert lokomotiv og frakter 626 tonn gods. I praksis vil nok togvektene bli noe lavere, da det ikke er nødvendig at hele toget består av vogner som skal kunne frakte semihengere, en type vogner som er forholdsvis tunge. Samtidig vil det i praksis være en del plasser i toget som ikke utnyttes.

2.4.2. Energibruk

Nettostrømforbruk til moderne lokomotiver som vi forutsetter brukt i studien er 19,5 wattimer per bruttotonnkilometer. Da er det forutsatt at bruttostrømforbruk er 24,0 wattimer per bruttotonnkilometer, og at lokomotivet har en tilbakemating på 4,5 wattimer per brutto tonnkilometer. Energiforbruket holdes konstant for hele tidsperioden, og er beregnet per brutto tonnkilometer som inkluderer godstogmengden og egenvekten til godstogene (Schlaupitz, 2013).

I beregningen av energibruk er det inkludert et overføringstap som følge av tap i omformere, kontaktledningen langs sporet samt tap i det offentlige høyspentnettet. Snittet for strømtapet for Sør-Norge er 16% beregnet som et tillegg til netto strømforbruk på lokomotivet. Snittet for Sør-Norge er all trafikk sør for Trondheim og inkluderer områder med høy trafikkbelastning og dermed lave tapstall, og Bergensbanen ligger derfor en god del høyere. For strekningen Alnabru-Bergen tar vi høyde for noe høyere tapstall enn resten av Sør-Norge, og antar at i dagens situasjon er tapet 30%. I scenario 1 med økende godstrafikk utnyttes strømsystemet bedre, og vi forutsetter at tapet reduseres til 25% fra 2026, og ytterlige utbedringer av jernbanen forutsettes å kunne gi et tapstall på 20% fra 2035 i dette scenarioet. Om dagens godsmengder videreføres, forutsetter vi at dagens tapstall på 30% fortsetter frem til 2050.

Vi estimerte total energibruk per tonnkilometer godstransport (kWh/tkm) basert på netto energibruk per bruttotonnkilometer, antatt strømtap, samt forventet total togvekt og lastvekt for hver togtype.

2.4.3. Jernbanestrekningen

I studien er det tatt utgangspunkt i at godstogene fra Alnabru til Bergen kjører 460 km, og da er det antatt at de kjører på jernbanestrekningene Alnabanen, Gjøvikbanen, Roa–Hønefossbanen og Bergensbanen. For å håndtere den fremtidige godsmengden innføres 620 m godstog, og dette utløser et behov for forlengelse av seks kryssingsspor på den aktuelle strekningen da dagens kryssingsspor ikke er lange nok. Det er antatt at de nye godstogene vil kreve 770 m lange kryssingsspor. De aktuelle kryssingssporene som må forlenges er Trengereid, Vaksdal, Dale, Ål, Veme, Sandermsen (Jernbanedirektoratet, 2020b; Jernbanedirektoratet, 2020c). I tillegg er det planlagt nye kryssingsspor som følge av et utvidet persontogtilbud ved Vieren, Urdland og Ygre. Disse kryssingssporene vil i tillegg bli ytterligere forlenget for å kunne tilfredsstille lengdekravet til de nye godstogene, og de ekstra

forlengelsene er inkludert i denne studien. Basert på oppgitte lengder av dagens kryssningsspor er det beregnet at innføringen av 620 m godstog utløser et behov for 3055 m med nye kryssningsspor.

2.4.4. Godsterminalene

I 2024 skal godsterminalen i Bergen bli den første godsterminalen i Norge som driftes helt utslippsfritt ifølge Bane NOR. Det er planlagt betydelige elektrifiseringstiltak som blant annet kun elektriske godstog, elektrifiserte spor, elektrisk løfteutstyr, ladepunkter og elektrisk tilkobling av kjølecontainere. I tillegg skal det bygges to nye terminalbygg som forsynes med energi fra fjernvarme og solceller (Bane NOR, 2020a). Kapasiteten til godsterminalen vil da kunne dobles. Moderniseringen av stasjonsområdet i Bergen har en kostnadsramme på 1,5 milliarder kroner (Bane NOR, 2020b), da disse tiltakene omhandler mer enn bare godstransport er det antatt at halvparten av investeringskostnadene vil være direkte koblet til godsmengden og er derfor inkludert i denne studien. Det er også antatt at moderniseringen ved Alnabru tilsvarer halvparten av bidraget fra godsterminalen i Bergen, fordi den økte trafikken på strekningen kun øker 50% er det naturlig å legge inn en utvidelse på Alnabru som skaleres i trad med dette.

Moderniseringstiltakene som omhandler drift er antatt å ikke ha betydelig innvirkning på resultatene, og som følge av begrenset datagrunnlag er de ikke inkludert i beregningene.

2.4.5. Estimering av klimagassutslipp for godstog og jernbanen

I denne seksjonen gjennomgås beregninger av utslipp knyttet til godstogene og nødvendig infrastruktur. Først gjennomgås utslippsberegning for produksjon, avhending og vedlikehold, deretter bruk. Klimagassutslipp som oppstår i byggefasen (kryssingsspor og godsterminaler) er beregnet når de oppstår, som punktutslipp. De klimagassutslippene som er som følge av drift, vedlikehold og fornying av eksisterende infrastruktur, samt bruk av transportmidler skjer kontinuerlig over livstiden, og er av den grunn normalisert over tidsperioden.

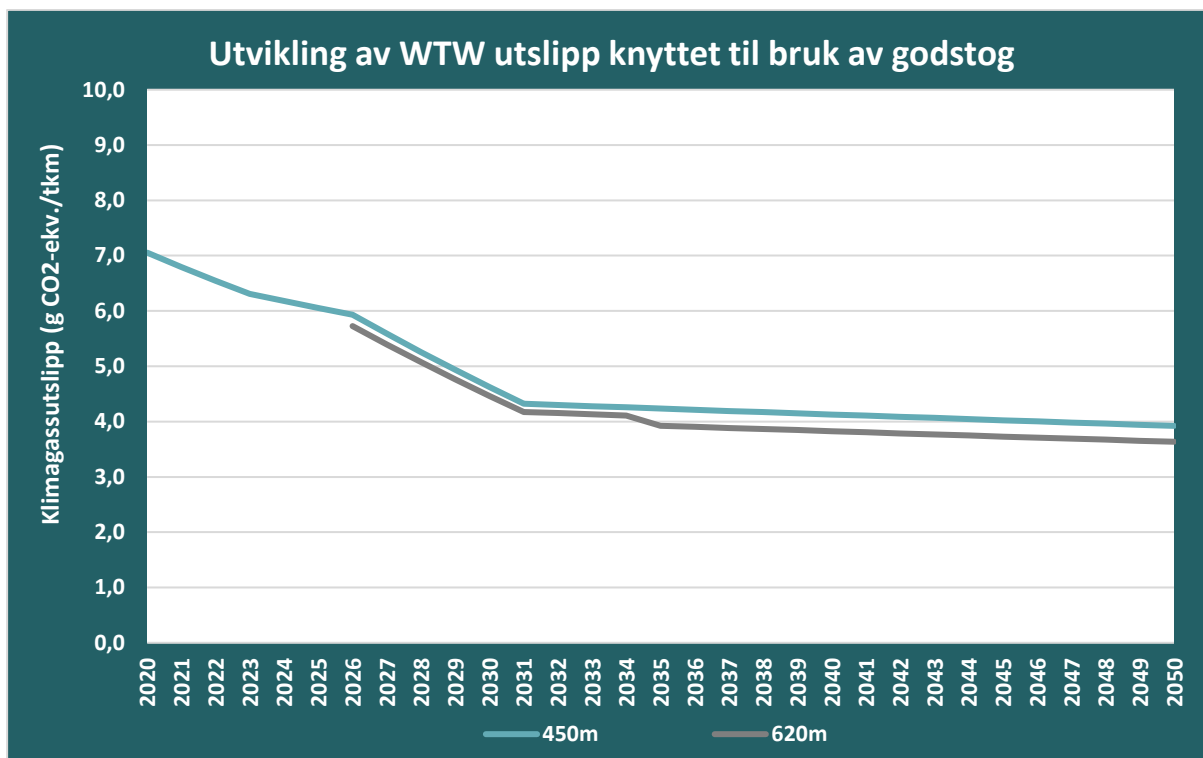
2.4.5.1. Produksjon, vedlikehold og avhending av godstog

Klimagassutslipp knyttet til produksjon, vedlikehold og avhending av godstog er beregnet basert på prosesser fra LCA-databasen *ecoinvent* 3 for både lokomotiver og godsvogner. For produksjon av godstog på 450 m har vi antatt et klimagassutslipp på 29 tonn CO₂-ekv. årlig. For godstog som er 620 m har vi tatt utgangspunkt i samme utslippsfaktor som for 450 m, men juster opp til å inkludere den ekstra lengden.

2.4.5.2. Bruk

Ut fra estimert energibruk per tonnkilometer godstransport (kWh/tkm) og utslippsfaktorer for høyspent nordisk elektrisitet (g CO₂-ekv./kWh) beregnet vi klimagassutslipp knyttet til bruk av de fullelektriske godstogene. Utslippsberegningene baserer seg på det såkalte «well-to-wheel» (WTW) prinsippet, som beskrevet for lastebilene i del-seksjon 2.3.4.2. Elektriske godstog som bruker høyspent strøm har kun indirekte utslipp (WTT) som skjer oppstrøms bruken av godstoget, og av den grunn er WTT-utslipp og WTW-utslipp like ettersom de ikke har TTW-utslipp fra forbrenning av drivstoff. Detaljert beskrivelse av beregning av utslippsfaktor for nordisk strøm bruk er gitt i Vedlegg F. Utregningen baserer seg i grove trekk på NVEs estimat av nordisk strømprroduksjon og utslippsfaktorer for ulike energikilder.

Figur 8 viser utvikling av WTW-utslipp knyttet til bruk av godstogene.



Figur 8 Utvikling av WTW-utslipp knyttet til bruk av godstogene.

2.4.5.3. Eksisterende banekonstruksjon

Klimagassutslipp knyttet til konstruksjon, vedlikehold, drift og avhending er basert på prosesser fra LCA-databasen *ecoinvent 3*. Prosessene ble modifisert for norske forhold ved å endre strømmiksen til norsk strøm. Utslipp knyttet til togbane er estimert på en kontinuerlig basis og er beregnet per tkm i henhold til prosesser og anbefalinger i databasen. Konstruksjon og avhending av 1 m togbane har et samlet utslipp på 47,35 kg CO₂-ekv./m-år. Utbygging, vedlikehold og drift av den aktuelle strekningen har et samlet utslipp på 0,322 g CO₂-ekv./pkm, som basert på beregninger gjort av Asplan Viak i et underlag til Avinors bærekraftrapport for 2020 (Asplan Viak, 2020b). Som følge av at jernbanestrekningen brukes til både godstransport og persontransport er det gjort en allokering av slitasjebidraget, der én tonnkilometer tilsvarer 5 personkilometer (Asplan Viak, 2020b).

2.4.5.4. Ny infrastruktur

I studien er utslippsestimater for moderniseringen av godsterminalene i Bergen og Alnabru inkludert og beregnet basert på investeringskostnader (NOK), og en aggregert generell utslippsfaktor for bygg og anleggsvirksomhet som brukes i Klimakost, 0,026 kg CO₂-ekv./NOK (Asplan Viak, 2020a). En slik utslippsfaktor skiller ikke på de ulike aktivitetene knyttet til konstruksjonsfasen.

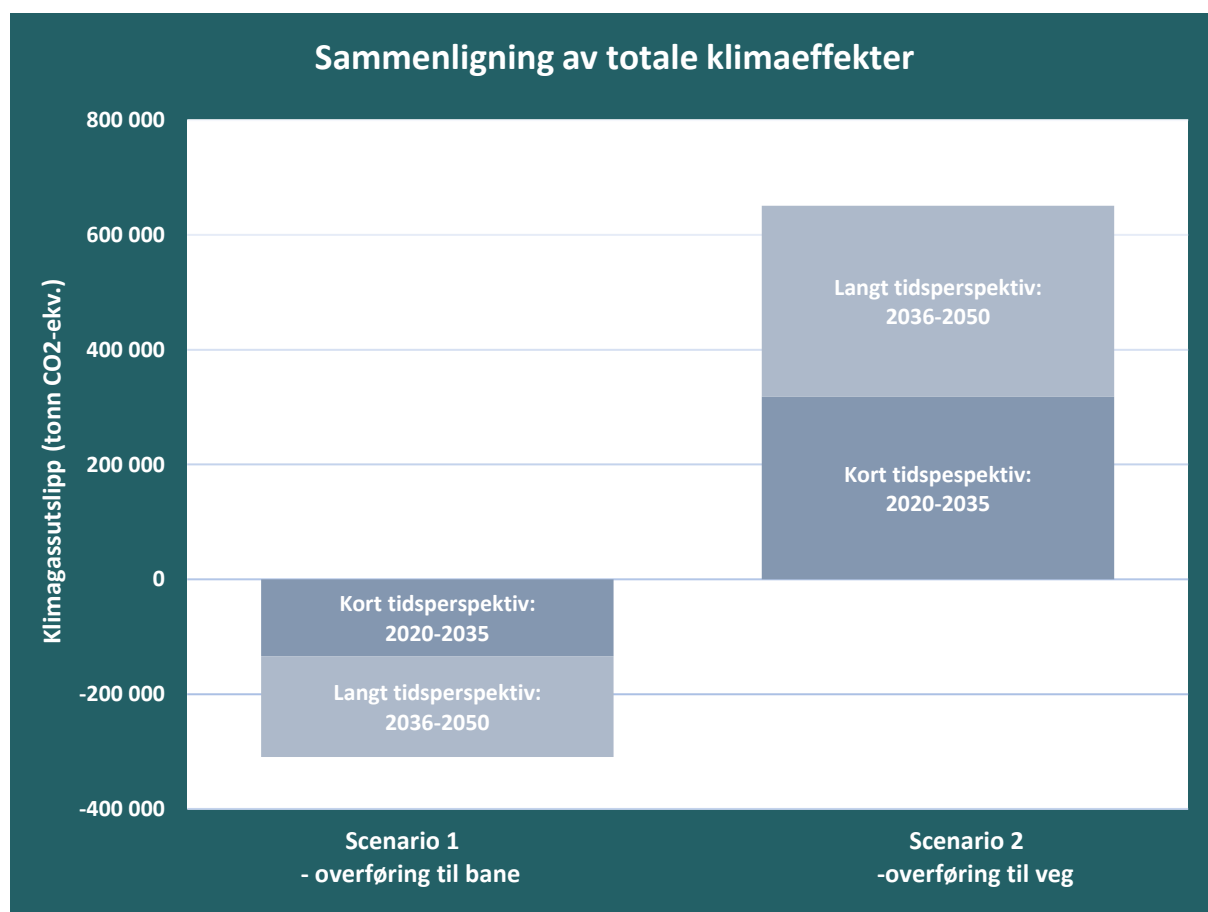
Klimagassutslippene knyttet til forlengelse av krysningssporene er basert på utslippsfaktor fra LCA-databasen *ecoinvent 3*, og justert for norsk strømmiks. 47,35 kg CO₂-ekv./m-år. Ifølge databasen inkluderer denne utslippsfaktoren konstruksjon, vedlikehold og avhending.

3. RESULTATER

I dette kapittelet presenteres resultatene fra LCA-studiet. Det er hovedsakelig klimaeffekten ved de ulike tiltakene i scenarioene som utgjør resultatene. Delkapittel 3.1 gir en oversikt og sammenlikner de totale klimaeffektene til hvert scenario for hele tidsperioden fra 2020 til 2050. Delkapittel 3.2 viser resultatene for scenario 1 med godsoverføring til bane. Delkapittel 3.3 oppsummerer resultatene for scenario 2 med godsoverføring til veg. Vedlegg H presenterer de detaljerte årlige klimagassutslippene for all godstransport på strekningen, og det som utgjør grunnlaget for resultatene som er presentert i dette kapittelet. Resultatene viser endringene i forhold til situasjonen i dag, gitt transportmengdene på henholdsvis veg og bane i 2015–2017.

3.1. Overordnede resultater

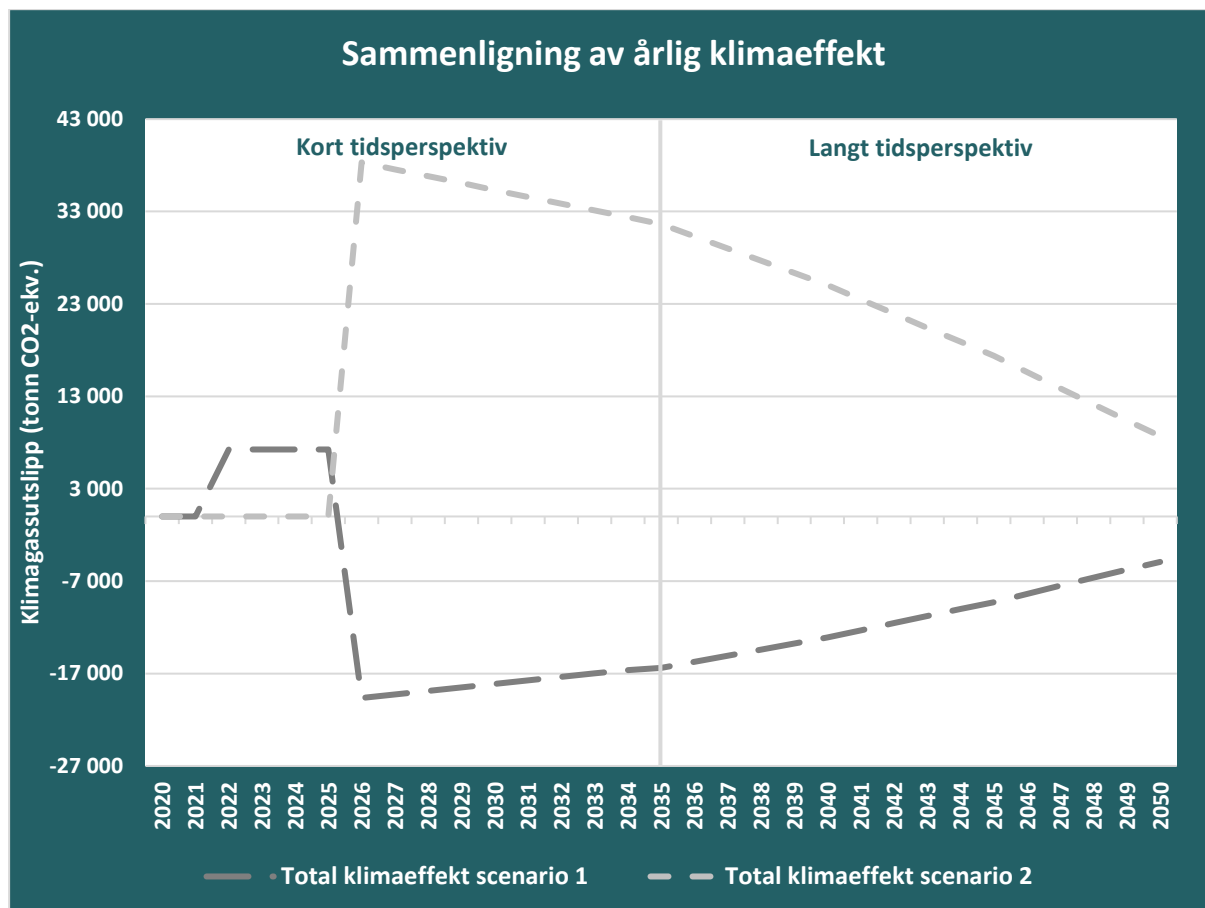
De totale klimaeffektene for begge scenarioene er vist i Figur 9 Sammenligning av de totale klimaeffektene for de to scenarioene. Det fremkommer av resultatene at scenario 1 med godsoverføring til bane oppnår over tidsperioden en klimabesparelse både i et kort- og langt tidsperspektiv med totalt -0,31 millioner tonn CO₂-ekv. Scenario 2 med 100% godsoverføring til veg som følge av nedlegging av godstransport på bane øker klimagassutslippene med 0,65 millioner tonn CO₂-ekv. for hele tidsperioden.



Figur 9 Sammenligning av de totale klimaeffektene for de to scenarioene.

I et kort tidsperspektiv oppnår tiltakene i scenario 1 besparelser som utgjør 0,13 millioner tonn CO₂-ekv., og på lang sikt viser oversikten at scenario 1 oppnår besparelser på 0,18 millioner tonn CO₂-ekv. Virkningene av tiltakene i scenario 2 resulterer i klimagassutslipp som på kort sikt utgjør 0,32 millioner tonn CO₂-ekv. og i et langt perspektiv 0,33 millioner tonn CO₂-ekv.

Figur 10 viser en sammenligning av de årlige klimaeffektene for begge scenarioene, og hvordan de utvikler seg over kort- og langt tidsperspektiv. De neste del-kapitlene presenterer detaljerte resultater for begge scenarioene og synligjør hvilke deler av livsløpet som bidrar til de største klimagassutslippene for både veg og bane.

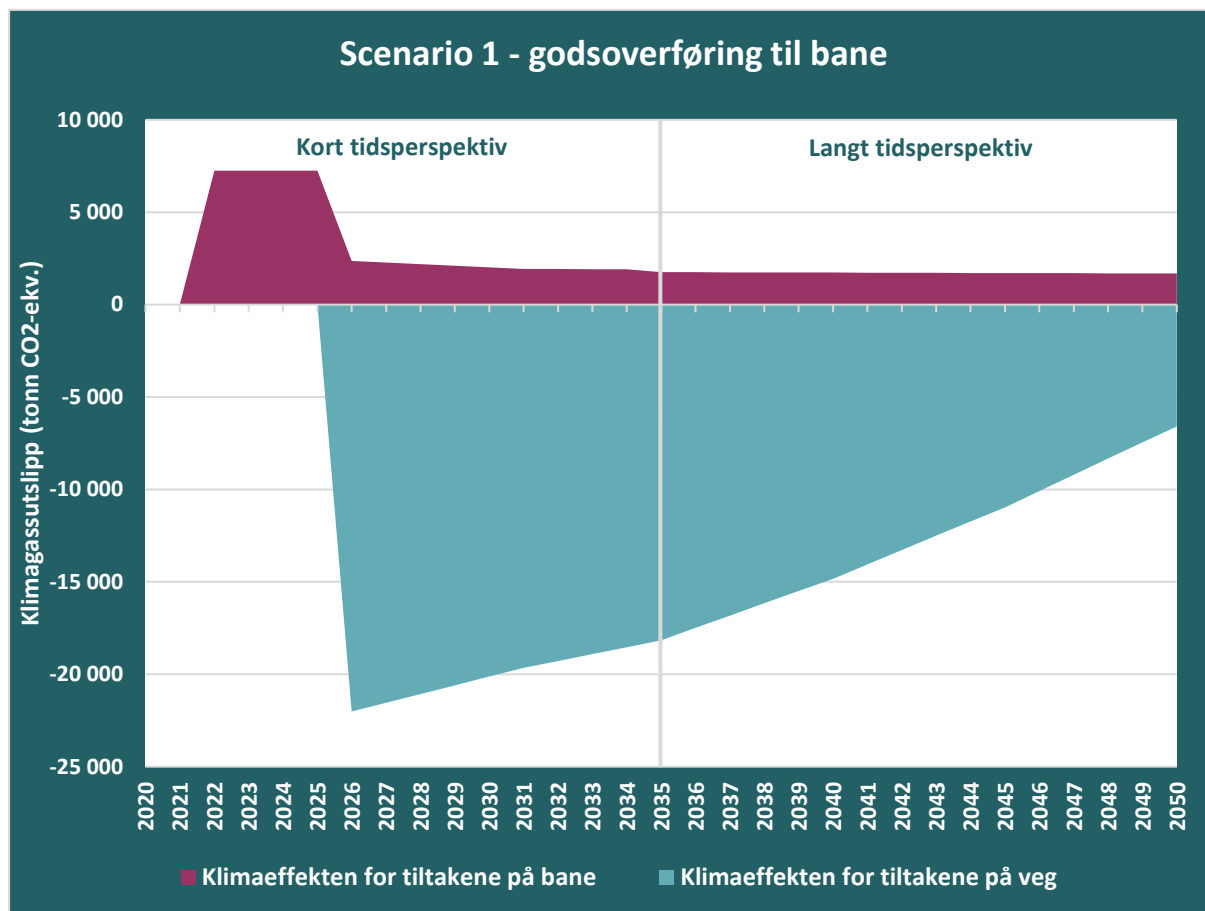


Figur 10 Sammenligning av de årlige totale klimaeffektene for de to scenarioene.

Estimerte utslippsfaktorer oppgitt i gram CO₂-ekv. per tonnkilometer godstransport mellom Alnabru og Bergen ved de ulike transport teknologiene er oppsummert i Vedleggstabell 6 i Vedlegg I. Disse utslippsfaktorene inkluderer alle direkte- og indirekteutslipp knyttet til godstransporten, men ikke ny infrastruktur.

3.2. Scenario 1 – overføring til bane

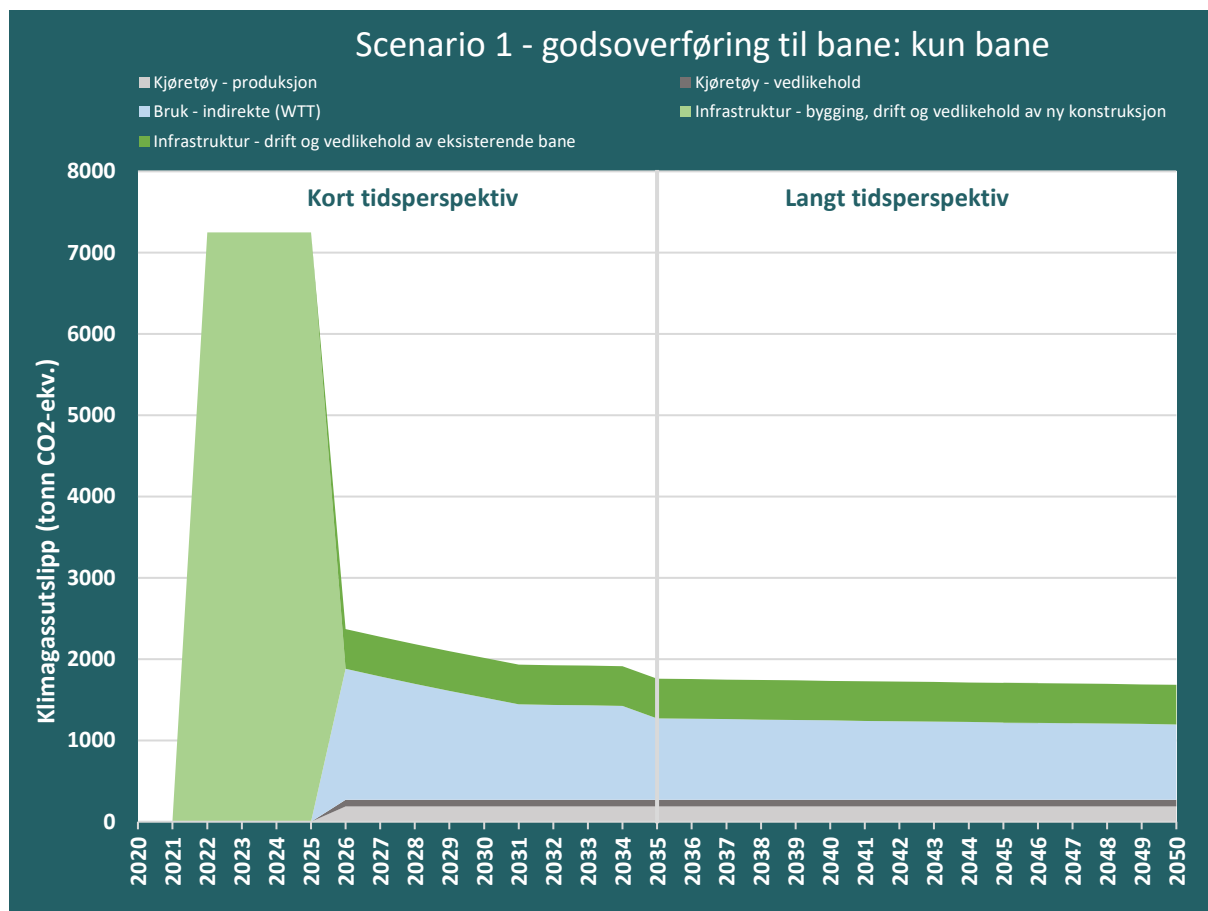
Scenario 1 betrakter en 50% økning av godstransport på bane som følge av infrastrukturutbygging frem mot 2025, og en overgang fra 450 m til 620 m godstog fra og med 2026. Figur 11 viser utviklingen av de årlige klimagassutslippene knyttet til tiltakene for scenarioet i et kort- og langt tidsperspektiv. Resultatene er fordelt på klimaeffekten for bane og veg, og man ser at en godsoverføring fra veg til bane fører til betydelige reduksjoner i årlige utslipp for veg.



Figur 11 Utvikling av årlig klimaeffekt for tiltakene i scenarion 1 i et kort- og langt tidsperspektiv, fordelt på tiltakene som skjer på bane og veg.

3.2.1. Bane

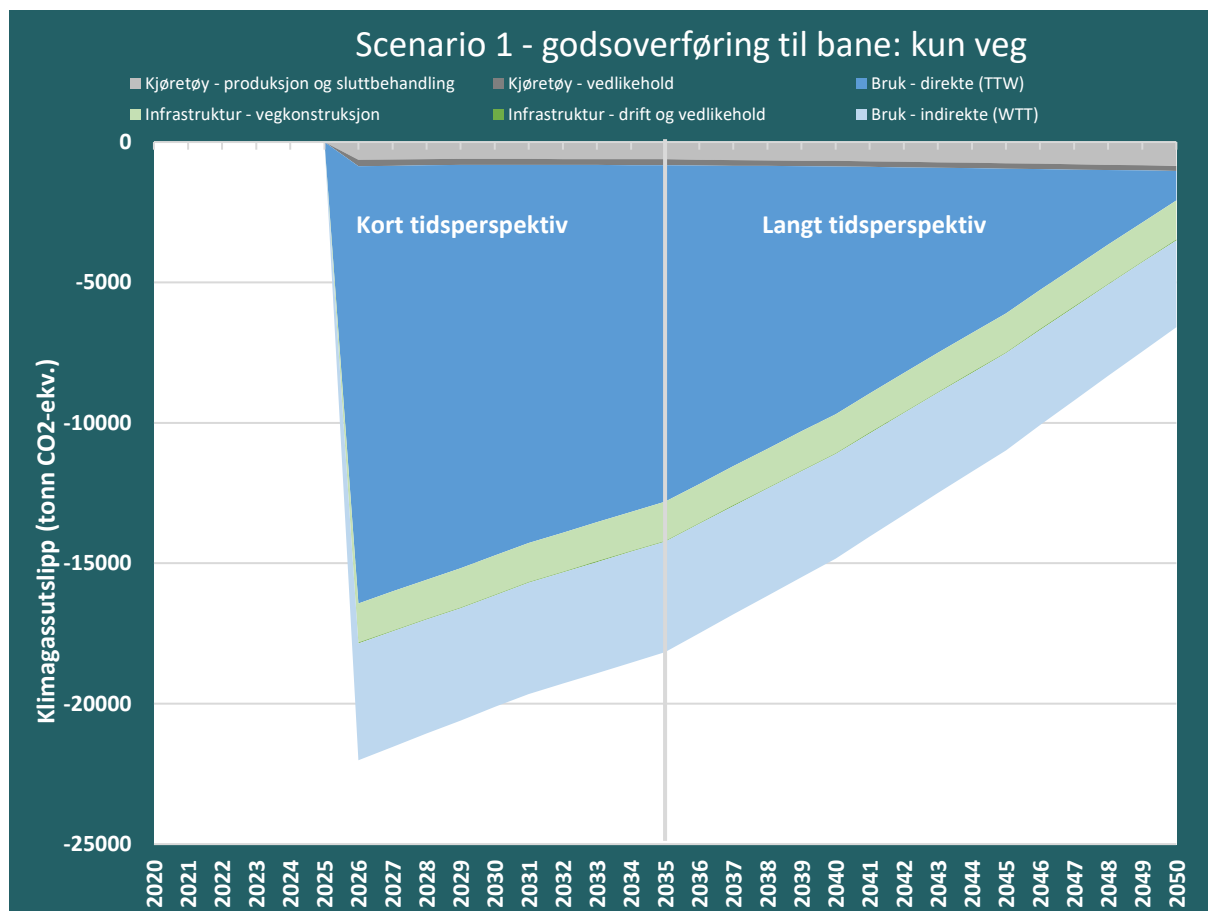
Figur 12 viser detaljert utvikling i klimagassutslipp knyttet til den økte godstransporten via bane i scenarion 1. Det investeres i moderniseringen og ombygging av godsterminalene som utgjør en betydelig del da dette er beregnet som punktutslipp i byggeårene 2022 til 2025, og dette bidrar til at de årlige utslippene går opp i den perioden. Fra 2026 ser man at de økte klimagassutslippene for tiltakene skyldes økt energiforbruket som følge av at økt godsmengde blir transportert via bane, men utslippene reduseres over tid som følge av lavere utslippsintensitet for den nordiske strømmiksen og lavere strømtap.



Figur 12 Utvikling i årlig klimaeffekt for jernbanen i scenario 1 som følge av at en del av godsmengden overføres til bane.

3.2.2. Veg

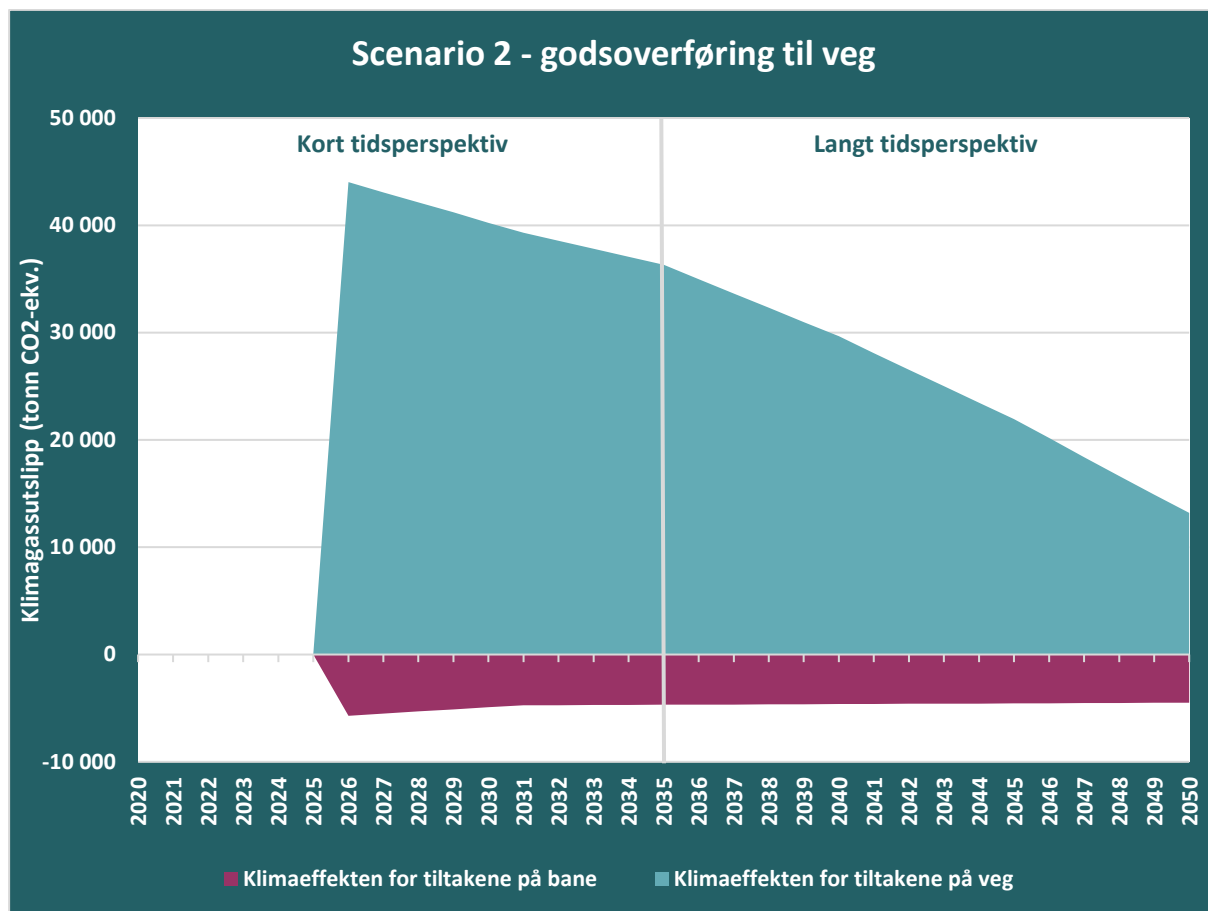
Figur 13 viser detaljert utvikling i klimagassutslipp knyttet til tiltakene for veg i scenario 1. Som følge av 50% økt godstransport via jernbane reduseres godsmengden som fraktes via veg betraktelig, og klimagassutslippene reduseres som følge av dette. Disse reduksjonene utgjør klimabesparelsene for de totale klimaeffektene til scenario 1. Figuren viser at tiltakene hovedsakelig bidrar til reduksjon av klimagassutslipp i bruksfasen.



Figur 13 Årlige klimaeffekt for godstransport via veg som følge av at godsmengden overføres til bane i 2026.

3.3. Scenario 2 – godsoverføring til veg

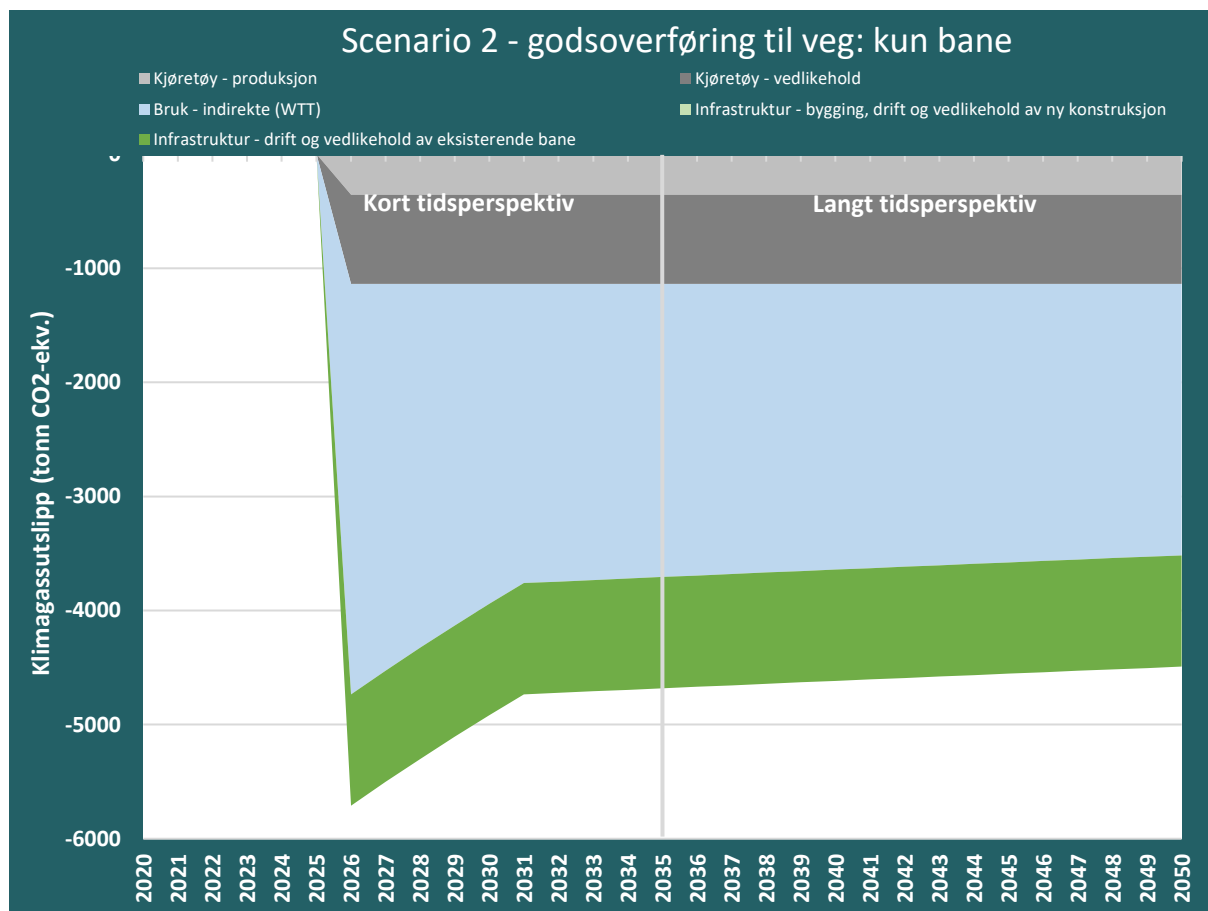
Scenario 2 betrakter en 100% økning av godstransport via veg fra og med 2026. I dette scenariet vil det altså ikke være noe godstransport via bane etter 2025. Figur 14 viser utviklingen av de årlige klimaeffektene som følge av tiltakene for scenarioet i et kort- og langt tidsperspektiv. Fra figuren ser man at det skjer en betydelig økning i de årlige klimagassutslippene for godstransport på veg fra 2026, dette skyldes at alt av gods på bane flyttes over på veg. Seksjonene under gir detaljert innsikt i resultatene for bane og veg for scenarioet.



Figur 14 Utvikling av årlig klimaeffekt for tiltakene i scenarior 2 i et kort- og langt tidsperspektiv, fordelt på effektene som skjer på bane og veg.

3.3.1. Bane

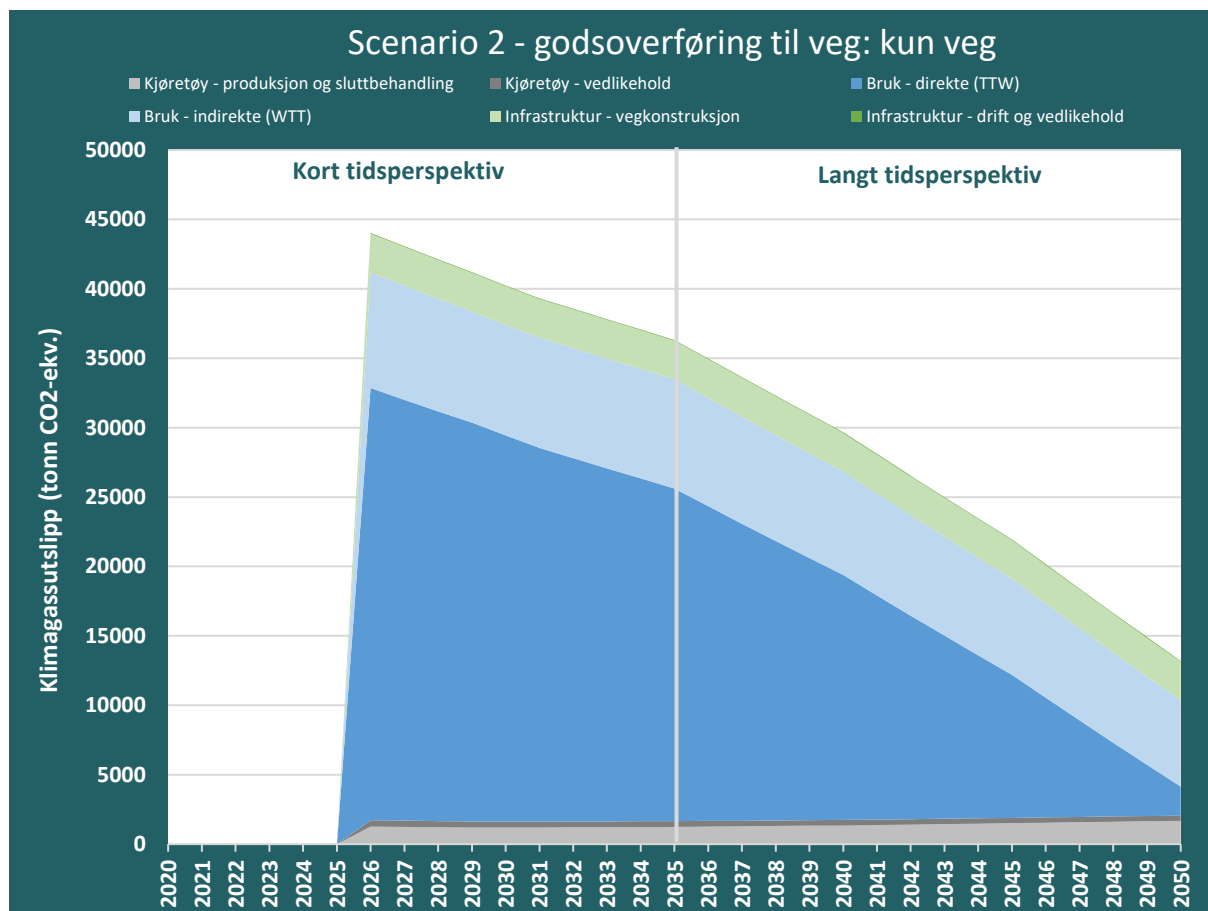
Figur 15 viser detaljert utvikling i klimagassutslipp knyttet tiltakene for godstransport via bane i scenarior 2. I og med at all godstransport via bane legges ned i 2026 oppnår man en klimabesparelse for jernbane som er vist i figuren.



Figur 15 Utvikling i årlig klimaeffekt for jernbanen i scenario 2 som følge av at godsmengden overføres til veg.

3.3.2. Veg

Figur 16 viser detaljert utvikling i klimagassutslipp knyttet til den økte godstransporten via veg i scenario 2. Som følge av at all godstransport som ble fraktet via bane flyttes over på veg fra og med 2026 ser man betydelig økning i klimagassutslipp fra 2025 til 2026. Klimagassutslippene som skjer på veg, er betydelig høyere enn klimabesparelsene som ble oppnådd for jernbanen. Det er hovedsakelig de direkte og indirekte utslippene knyttet til bruksfasen som øker, og dette følger i stor grad den antatte utviklingen av lastebilflåten for godstransport via veg.



Figur 16 Utvikling i årlige klimaeffekt for godstransport via veg som følge av at all godsmengde overføres til veg i 2026.

4. DISKUSJON

Dette kapitlet tar for seg vurderinger av resultatene, og diskuterer begrensningene og usikkerhetene i studien.

4.1. Tidsperspektiv

Resultatene for alle scenarioene er fremstilt i et kort- og langt tidsperspektiv for å synliggjøre usikkerheten i resultatene. En sentral usikkerhet er knyttet til utviklingen av utslippsintensiteter for energimiksene. Utviklingen av utslippsintensiteter for energimiksen er basert på NVE sin rapport for framskrivninger av nordisk kraftproduksjon til 2040, og NVE poengterer i rapporten at framskrivninger langt frem i tid alltid vil innebære betydelig usikkerhet (NVE, 2019). Deres framskrivninger for årene 2022, 2025, 2030 og 2040 er basert på vurderinger av produksjon for hver enkelt teknologi i hvert av de nordiske landene, unntatt Island. Analysen og framskrivningene til NVE er gjort basert på dagens rammevilkår og dagens kunnskap om teknologiutvikling og energipolitikk. I dette LCA-studiet har vi basert oss på arbeidet fra NVE, samt at vi har gjort ytterligere framskrivninger til 2050, noe som øker usikkerhetene ytterligere for perioden 2040-2050.

4.2. Scenario 1 – overføring til bane

Overordnet hadde scenario 1 størst besparelse av klimagassutslipp sammenlignet med scenario 2. Resultatene viser at godstransport via jernbane har lavest klimabelastning under de forutsetningene som er lagt til grunn i analysen.

Forutsetningen om at 50% av godsmengden som transporteres via veg kan overføres til bane er i noen grad usikker. Grunnlaget for den antatt godsmengden baserer seg på data fra SSB og inkluderer alt som transporteres på strekningen mellom Akershus/Oslo og Hordaland, altså også gods som transporteres til steder som har start- og/eller endepunkt et stykke unna jernbanen. Samtidig er ikke gods på veg som har start- eller endepunkt i Hordaland og som skal til eller kommer fra andre deler av landet eller i utlandet med i tallet. Også en del av dette godset kan det være aktuelt å flytte fra vei til bane mellom Oslo og Bergen. Et annet usikkerhetsmoment i studiet er at det ikke er inkludert en ekstra transportdistanse knyttet til lastebiltransport mellom godsterminalen og mottaker/avsender.

Fra resultatene så man at klimagassutslippene fra de nye investeringene knyttet til godsterminaler og kryssingsspor førte til høye utslipp i perioden konstruksjonen foregår, mens utslippene fra drift og vedlikehold av jernbane og godstogene holder seg stabilt med en liten justering som følge endring i strømmiksen og redusert tap i strømmettet. Utslippene fra konstruksjonsperioden kunne vært avskrevet årlig slik som de resterende fasene av livsløpet, og dermed ville man ikke sett den økningen i utslippene mellom 2022 og 2025.

Det er forutsatt at godstogene som er 450 m og 620 m har samme netto strømforbruk på tonn-km, men det er usikkert om nåværende lokomotiv vil være tilstrekkelig for de nye godstogene. Jernbanedirektoratet (2019) viser i sine antagelser at de forventer at 450 m godstog bruker 4-akslet lokomotiv, og 620 m 6-akslet lokomotiv, av den grunn kan det være noe underestimert av de indirekte utslippene for de nye godstogene.

I og med at dagens jernbanenett hovedsakelig består av enkeltspor på strekningen, kjører både persontog og godstog på den aktuelle traséen. Dette medfører at nødvendig vedlikehold og fornyelses som følge av slitasje ikke alene kan tildeles godstransporten. Det er av den grunn antatt at én tonn-km sliter like mye som fem person-km, noe som samsvarer med tidligere analyser gjennomført av Asplan Viak. Dette er også et aspekt som virker inn på utslippene knyttet til vedlikehold av veg.

Modelleringen av moderniseringen av godsterminalene var basert på økonomiske utslippsfaktorer, og det ble ikke gjort en grundig vurdering av hvor stor andel av planlagt investeringskostnad som faktisk kommer til å bidra til godstransport. Det ble antatt at halvparten av planlagt investering i Bergen ville

ha et bidrag, og at Alnabru hadde halvparten av bidraget fra Bergen. Disse antagelsene er usikre og vil påvirke resultatet for årene 2022-2025. Detaljerte fysiske data som viser planlagt forbedringer på godsterminalene ville potensielt gitt et mer nøyaktig bilde, men ble for omfattende til å kunne inkludere i denne studien. Et annet aspekt ved godsterminalene er ekskluderingen av driftsfasen, noe som ville ha bidratt til å øke utslippene i hele tidsperioden. Med tanke på at godsterminalen i Bergen moderniseres til å bli hel-elektrisk og utslippsfri, ville dette blitt synlig i denne livsfasen.

4.3. Scenario 2 – godsoverføring til veg

Tiltakene i scenario 2 hadde de høyeste klimagassutslippene, og man så en betydelig økning av klimagassutslipp i 2026 som følge av godsoverføringen til veg. Utslippene øker fordi teknologiutviklingen for modulvogntogene innen 2026 ikke har utviklet seg i stor grad over til hydrogen og batterier, og dette betyr at godsmengden som tidligere ble fraktet med elektriske tog, i et kort tidsperspektiv flyttes over til modulvogntog med diesel som drivstoff. Som vist i del-seksjon 2.3.1, er det først i perioden 2030-2050 at man forventer en betydelig innfasing av modulvogntog som er utslippsfrie, og det er da man ser en reduksjon i de årlige klimagassutslippene. Det er knyttet en del usikkerhet til antagelsene som ble gjort i modelleringen av lastebilflåten, og da spesielt til det faktum at man ikke med sikkerhet kan vite hvordan teknologien kommer til å utvikle seg langt frem i tid. En annen usikkerhet knyttet modulvogntogene er forventet energiforbruk på den aktuelle strekningen, da det eksisterer lite data fordi modulvogntog først ble tillatt i desember 2020.

En begrensning i dette scenarioet er forutsetningen om at 100% av godsmengden overføres fra bane til veg som følge av innføring av modulvogntog og nullutslipps-teknologi for lastebiler, uten å utløse behov for forbedring og utbygging av veg-infrastrukturen. Dette kan potensielt ha ført til et underestimat av klimagassutslippene i dette tiltaket, og dette er derfor noe som burde undersøkes videre. Hvis tiltaket hadde utløst at dagens 2-feltsveg mellom Oslo og Bergen måtte bli utbedret til en 4-felts motorveg på deler av strekningen ville dette utløst et klimagassutslipp på 1 447 tonn CO₂-ekv. per km utbygging av 2-feltsveg, som beskrevet i Vedlegg G.

Et annet aspekt ved nedleggelsen av godstransport på bane er at godsterminalene frigjøres til andre formål. Dette kan bidra til arealbesparelser da man kan anta at de 75 000m² som er godsterminalen kan føre til at urørte arealer ikke utsettes for utbygging. Dermed får man et tiltak som minsker de totale klimagassutslippene, men som ikke er inkludert i dette studiet.

5. KONKLUSJON

Formålet til dette LCA-studiet var å dokumentere klimaeffektene ved ulike alternative godsoverføringsalternativer via bane og vei for strekningen Alnabru-Bergen. En livsløpsvurdering var ønsket for å få et fullstendig bilde av både de direkte og indirekte klimagassutslippene for den aktuelle godstransporten. Gitt de forutsetningene som lå til grunn i analysen fremgår det av resultatene at 50% godsoverføring fra veg til jernbane er det tiltaket som oppnår høyest klimabesparelse i løpet av perioden 2020–2050. Denne studien gir en indikasjon på potensialt som ligger i reduksjon av årlige klimagassutslipp som følge av å flytte godstransporten mellom veg og bane. Studiet gir et konservativt estimat, og videre studier bør undersøke hvor realistisk det er å flytte over godsmengden, samt inkludere en detaljert vurdering av hva som utløses av infrastrukturbehov og da spesielt med fokus på vegutbygging.

KILDER

Asplan Viak (2020a) *Utslippsfaktor fra Klimakost*. Available at: <https://www.klimakost.no/>

Asplan Viak (2020b) *Klimapåvirkning fra personreiser med fly, tog og bil*; supplerende rapport til Avinors bærekraftsrapport 2020. Available at: https://avinor.no/globalassets/_konsern/om-oss/rapporter/avinor_baerekraftsrapport_2020.pdf

Bane NOR (2020a) *Bergen får Norges grønneste godsterminal*. Available at: <https://www.banenor.no/Nyheter/Nyhetsarkiv/2020/bergen-far-norges-gronneste-godsterminal/> (Accessed: 22 February 2021).

Bane NOR (2020b) *Bane NOR kunngjør stort byggeprosjekt i Bergen på en ny måte*. Available at: <https://www.banenor.no/Nyheter/Nyhetsarkiv/2020/bane-nor-kunngjør-stort-byggeprosjekt-i-bergen-pa-en-ny-mate/> (Accessed: 2 March 2021).

Baumann, H. and Tillmann, A.-M. (2004) *The Hitch Hiker's Guide to LCA*. Lund, Sweden: Studentlitteratur.

Corporate, R. T. (no date) *RENAULT TRUCKS BROADENS ITS ALL-ELECTRIC RANGE | Renault Trucks Corporate*. Available at: <https://www.renault-trucks.com/en/newsroom/press-releases/renault-trucks-broadens-its-all-electric-range> (Accessed: 4 March 2021).

Dér, A. et al. (2018) 'Life Cycle Engineering of Carbon Fibres for Lightweight Structures', *Procedia CIRP*, 69(May), pp. 43–48. doi: 10.1016/j.procir.2017.11.007.

Ellingsen, L. A.-W. et al. (2014) 'Life cycle assessment of a lithium-ion battery vehicle pack', *Journal of Industrial Ecology*, 18(1), pp. 113–124. doi: 10.1111/jiec.12072.

Ellingsen, L. A.-W. (2020) *Life cycle assessment of express boat propulsion systems*.

Ellingsen, L. A.-W., Singh, B. and Strømman, A. H. (2016) 'The size and range effect: lifecycle greenhouse gas emissions of electric vehicles', *Environmental Research Letters*, 11(5), pp. 1–8. doi: 10.1088/1748-9326/11/5/054010.

Ellingsen, L. A., Hung, C. R. and Strømman, A. H. (2017) 'Identifying key assumptions and differences in life cycle assessment studies of lithium-ion traction batteries with focus on greenhouse gas emissions', *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 55, pp. 82–90.

Hellweg, S. and Milà i Canals, L. (2014) 'Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment.', *Science (New York, N.Y.)*, 344(6188), pp. 1109–13. doi: 10.1126/science.1248361.

Hyundai Media Newsroom (2020) *Hyundai XCIENT Fuel Cell Heads to Europe for Commercial Use*.

Jernbanedirektoratet (2019) *Tilbudskonsepter, rutemodeller og samfunnsøkonomisk analyse*. Available at: <https://www.jernbanedirektoratet.no/globalassets/strategier-og-utredninger/godsstrategi/delrapport-ii---tilbudskonsepter-og-rutemodeller.pdf> (Accessed: 4 February 2021).

Jernbanedirektoratet (2020a) *Jernbanen mot 2050. Jernbanedirektoratets perspektivanalyse*. Available at: <https://www.jernbanedirektoratet.no/no/strategier-og-utredninger/Strategier/perspektivanalyse-jernbanen-mot-2050/> (Accessed: 4 February 2021).

Jernbanedirektoratet (2020b) *Notat Jernbanesektorens oppdaterte analyser til NTP 2022-2033*. Available at:

<https://www.jernbanedirektoratet.no/contentassets/6c116f35d642475e915325069e496de4/ntp-2022-2033-opppdaterte-analyser-svarbrev.pdf/> (Accessed: 4 March 2021).

Jernbanedirektoratet (2020c) *Jernbanedirektoratets godsstrategi Strategisk utredning til NTP 2022–2033*. Available at: https://www.jernbanedirektoratet.no/globalassets/strategier-og-utredninger/godsstrategi/202000998-1-opppsummerende-notat-v1-378037_1_1-3.pdf/ (Accessed: 4 March 2021).

Liimatainen, H. and Nykänen, L. (2014) *Kuorma-autokannan hallintamalli KAHMA*.

Miljødirektoratet (2020) *Klimakur 2030, Tiltak og virkemidler mot 2030*. Available at: <https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/m1625/m1625.pdf> (Accessed: 11 January 2021).

Monterey Gardiner (2009) *DOE Hydrogen and Fuel Cells Program: Hydrogen Storage, U.S Department Of Energy*.

NVE (2019) *ANALYSE OG FRAMSKRIVNING AV KRAFTPRODUKSJON I NORDEN TIL 2040*. Available at: https://publikasjoner.nve.no/rapport/2019/rapport2019_43.pdf (Accessed: 2 March 2021).

NyeVeier (2020) *Nye Veiers prioriteringer NTP 2022-2033*. Available at: <https://www.regjeringen.no/contentassets/4e2506da7c1b486885c732eef6250bdc/nye-veiers-prioriteringer-v-011120.pdf> (Accessed: 4 January 2021).

Patel, A. and Dawson, R. (2015) 'Recovery of platinum group metal value via potassium iodide leaching', *Hydrometallurgy*, 157, pp. 219–225. doi: 10.1016/j.hydromet.2015.08.008.

Prussi, M. et al. (2020) *JEC Well-To-Wheels report v5*. doi: 10.2760/100379.

Rebitzer, G. et al. (2004) 'Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications', *Environment International*, 30(5), pp. 701–720. doi: 10.1016/j.envint.2003.11.005.

Renault (no date) *RENAULT TRUCKS BROADENS ITS ALL-ELECTRIC RANGE | Renault Trucks Corporate*. Available at: <https://www.renault-trucks.com/en/newsroom/press-releases/renault-trucks-broadens-its-all-electric-range> (Accessed: 4 February 2021).

Riksrevisjonen (2018) *Riksrevisjonens undersøkelse av overføring av godstransport fra vei til sjø og bane*.

Roland Berger (2017) *FCH Heavy-duty trucks Development of Business Cases for Fuel Cells and Hydrogen Applications for Regions and Cities*.

Scania (no date) *BATTERIDREVET, ELEKTRISK LASTEBIL*.

Schlaupitz Holger (2013) *Gods fra trailer til tog*. Available at: <https://naturvernforbundet.no/getfile.php/1347080-1516963626/Dokumenter/Rapporter%20og%20faktaark/2013/Gods%20fra%20trailer%20til%20tog.pdf> (Accesses: 26.3.2021)

Shiroishi, H. et al. (2012) 'Dissolution Rate of Noble Metals for Electrochemical Recycle in Polymer Electrolyte Fuel Cells', *Electrochemistry*, 80, pp. 898–903.

Usai, L. et al. (2021) 'Lifecycle assessment of fuel cell systems for light duty vehicles, current state-of-the-art and future impacts', *Journal of Cleaner Production*.

Wulf, C. and Kaltschmitt, M. (2018) 'Hydrogen supply chains for mobility-Environmental and

economic assessment', *Sustainability (Switzerland)*, 10(6), pp. 1–26. doi: 10.3390/su10061699.

Xu, F., Mu, S. and Pan, M. (2010) 'Recycling of membrane electrode assembly of PEMFC by acid processing', *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(7), pp. 2976–2979. doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.05.087.

VEDLEGG A

Hydrogenkjøretøy

Klimagassutslipp knyttet til hydrogenlastebilene ble beregnet ved å først etablere passende lastebilspesifikasjoner og deretter fastsette utslippsfaktorer. Teksten under går gjennom hvilke betraktninger og antagelser som ble gjort i analysen.

Modelleringen har blitt gjort basert på tilgjengelig informasjon om hydrogenlastebiler. For å modellere en 40 tonns hydrogenlastebil har vi tatt utgangspunkt i hydrogenlastebilene Hyundai XCIENT og Quantron Energon. Vedleggstabell 1 gir en oversikt over spesifikasjoner oppgitt for de to lastebilene.

Vedleggstabell 1 Oppgitte lastebilspesifikasjoner for kommersielle hydrogenlastebiler

	Hyundai	Quantron
PEMFC (kW)	190	130
Li-ion batteri (kWh)	73	110
Maks totalvekt (tonn)	36	44

Hyundai har en oppgitt rekkevidde på ca. 400 km, mens Quantron ikke oppgitt rekkevidde. I analysen antar vi at hydrogenlastebilen har en total kapasitet på 40 tonn, inkludert vekten på kjøretøyet og lasten, og er utstyrt med en 190 kW PEMFC brenselcelle og et 73 kWh Li-ion batteri. Videre antar vi at lastebilen har en hydrogentank med oppbevaringskapasitet på 32 kg komprimert hydrogen (350 bar), dette er i samsvar med Hydunais XCIENT (Hyundai Media Newsroom, 2020).

For å modellere hydrogenlastebilen på 60 tonn, skaleres brenselcella, hydrogentanken og batteriet i henhold til økt maksimal totalvekt fra 40 tonn til 60 tonn. Størrelsen på brenselcella, hydrogentanken og batteriet ganges derfor med 1,5. Spesifikasjonene til hydrogenlastebilene som er modellert i analysen er gitt i Vedleggstabell 2.

Vedleggstabell 2 Antatte spesifikasjoner for hydrogenlastebilene i analysen

	40 tonns lastebil	60 tonns lastebil
PEMFC (kW)	190	285
Li-ion batteri (kWh)	73	110
Maks totalvekt (tonn)	40	60
Hydrogentankens oppbevaringskapasitet (kg)	32	48

For modellering av brenselcellesystemet har vi basert utregningene på et LCA-studie som modellerer et brenselcellesystem for personbiler (Usai *et al.*, 2021). PEMFC-systemet kan deles inn i tre hovedkomponenter: brenselceller, hjelpesystemer og hydrogentanker. Vedleggstabell 3 gir en oversikt over størrelsen på disse komponentene i det opprinnelige studiet som vurderte en et brenselcellesystem for en hydrogenpersonbil (Usai *et al.*, 2021) og det som ble brukt i rapportens analyse som vurderer brenselcellesystemer for en 40 tonns og en 60 tonns hydrogenlastebil.

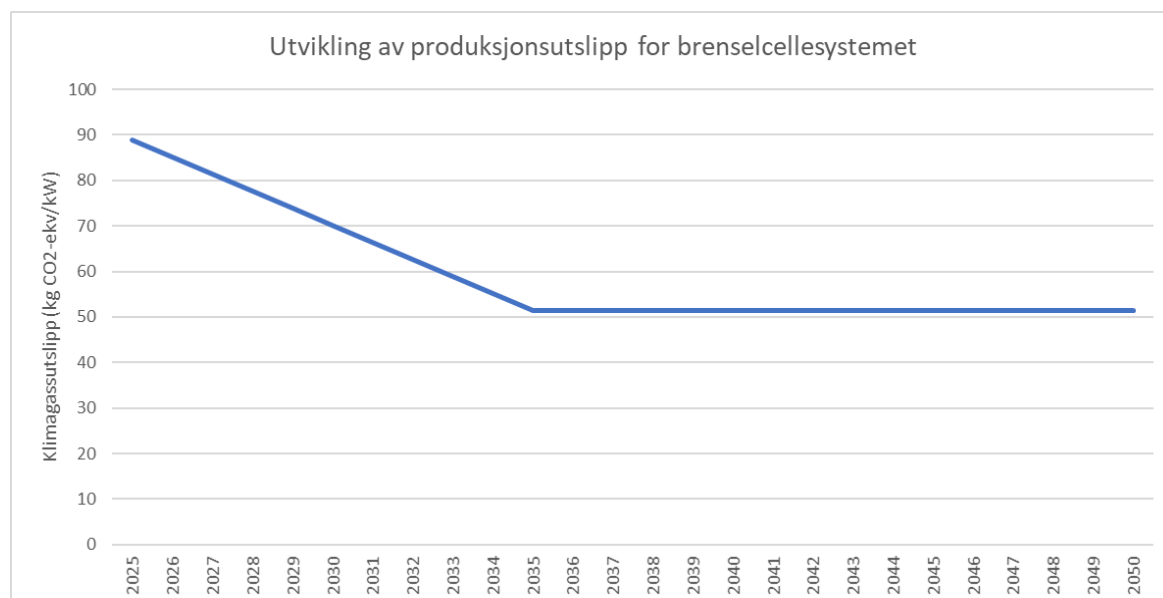
Vedleggstabell 3 Sammenligning av modellert PEMFC-system

	Usai et al. 2021	40 tonns lastebil	60 tonn lastebil
Brenselceller (kW)	80	190	285
Hjelpesystemer (kg)	59	140	210
Hydrogentankens oppbevaringskapasitet (kg)	5	32	48

Utslippsberegninger knyttet til produksjon av brenselcellene er basert i sin helhet på rapporterte funn fra brenselcellesystemer modellert for hydrogenpersonbilen (Usai *et al.*, 2021). I studien oppgis beregnede utslipp for et brenselcellesystem i 2020 og forventet utslipp for en to-stegs utvikling. Studien antar at utslipp knyttet til produksjon av brenselcellene går ned ganske fra 2154 kg CO₂-ekv. til 1248 i utviklingsfase 1 og ned til 471 kg CO₂-ekv. i utviklingsfase 2. Videre antar studien at utslipp knyttet til hydrogentankene går fra 1959 kg CO₂-ekv. til 1742 kg CO₂-ekv. i utviklingsfase 1 og videre ned til 918 kg CO₂-ekv. i utviklingsfase 2. For hjelpesystemene har studien beregnet et konstant avtrykk for hjelpesystemer på 854 kg CO₂-ekv.

I studien vår har vi skalert utslippene basert på størrelsen til brenselcellesystemets komponenter. Videre har vi antatt samme relative utslippsreduksjon for brenselcellene og hydrogentankene som rapportert av Usai *et al.*, 2021. Etter personlig kommunikasjon med studiens hovedforfatter har vi antatt at utviklingsfase 1 kan oppnås i 2025 og utviklingsfase 2 kan oppnås i 2035. Vi har videre gjort en lineær interpolering for å modellere utvikling mellom 2020 og 2025 og mellom 2025 og 2035. Etter 2035 mot 2050 antas ingen endring i utslipp.

Vedleggsfigur 1 viser utvikling av produksjonsutslippene for brenselcellesystemet på 190 kW. Ettersom vi antar at hydrogenlastebiler først kommer i bruk i 2025, er produksjonsutslipp vist fra 2025 frem mot 2050.



Vedleggsfigur 1 Utvikling av produksjonsutslipp for brenselcellesystemer.

Ved endt bruk av kjøretøy antas det at brenselcellesystemet blir sendt til resirkulering for avhending. For brenselcellene antar vi at ansvarlige aktører vil forsøke å gjenvinne platina. De vanligste platina utvinningsmetodene inkluderer selektiv klorering eller gassfasefordampning, hydrometallurgiske og pyrometallurgiske prosesser (Patel and Dawson, 2015). Fordi resirkuleringsdata ikke var tilgjengelig for

brenselceller, ble den hydrometallurgiske behandlingen av Li-ion-batterier i *ecoinvent*-databasen brukt som proxy. Mens *ecoinvent*-databasen også inkluderer pyrometallurgisk behandling av Li-ion-batterier, ble denne prosessen funnet mindre egnet fordi den pyrometallurgiske behandlingen av den fluorholdige Nafion-membranen ville resultere i utslipp av svært giftig hydrogenfluorid (Xu, Mu and Pan, 2010; Shiroishi *et al.*, 2012). Dermed ble utslippsfaktoren på 0,5 kg CO₂-ekv./kg antatt som proxy for avhending av brenselcellene og hjelpesystemene. Utslippsberegning for avhending av hydrogentankene laget av karbonfiber er basert på utslippsfaktor fra et LCA-studie som betrakter avhending av karbonfiber. Studien vurderer avhending gjennom deponering, forbrenning, mekanisk, pyrolyse, fluidbed og kjemisk behandling og rapporterer utslipp i området 0,035-3,1 kg CO₂-ekv./kg (Dér *et al.*, 2018). Selv om deponering er usannsynlig på grunn av strenge deponiforskrifter, er det usikkert hvilken av de andre avhendingsmetodene som vil bli brukt. Dermed ble det antatt gjennomsnittsverdien av de fem sistnevnte ovennevnte alternativene som resulterte i 1,7 kg CO₂-ekv./kg. Sammensetningen av brenselcellesystemet gir en total utslippsfaktor på 0.9 kg CO₂-ekv./kg.

Kjøretøy som går på brenselceller, trenger i tillegg et Li-ion batteri. Li-ion batterier er beskrevet i Vedlegg B.

VEDLEGG B

Li-ion batterier

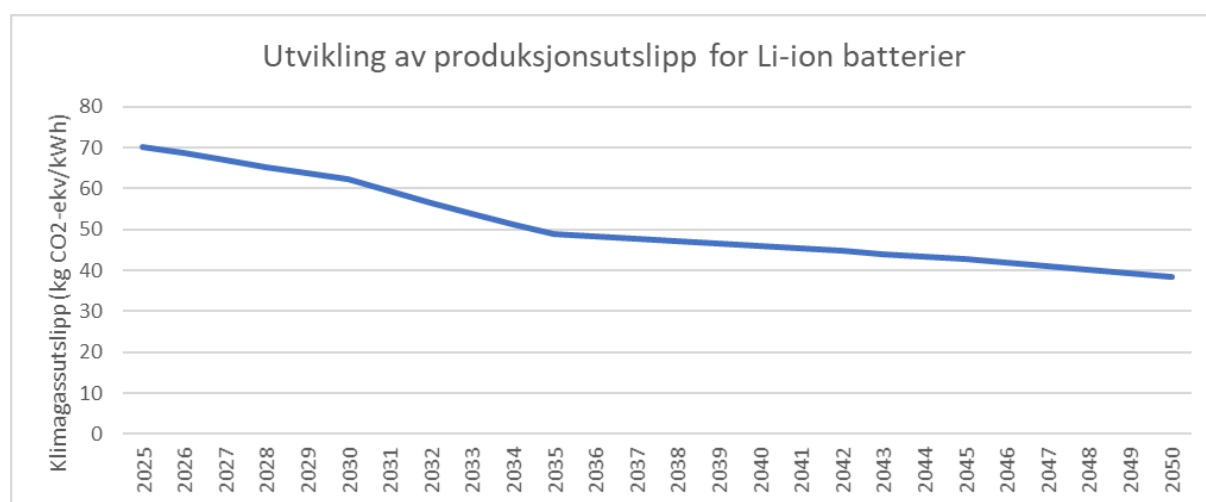
I modelleringen av Li-ion batterier antok vi en endring av batteriproduksjon over tid med tanke på batterifabrikkens produksjonslokasjon og produksjonskapasitet. Dessuten ble det også antatt at sammensetningen av katoden endrer seg over tid. Vedleggstabell 4 viser utvikling av batteriproduksjon fra 2025 til 2050. Utviklingen er antatt å være lineær mellom årene som ikke er vist.

Vedleggstabell 4 Utvikling av batteriproduksjon

Produksjonsområde	Katode	Plant type	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Asia	NCM 6:2:2	Stor	30%	10%	0%	0%	0%	0%
Asia	NCM 6:2:2	Gigafactory	45%	20%	0%	0%	0%	0%
Asia	NCM 8:1:1	Stor moderne	5%	20%	0%	0%	0%	0%
Asia	NCM 8:1:1	Gigafactory	10%	20%	0%	0%	0%	0%
Norden	NCM 8:1:1	Gigafactory	10%	30%	60%	20%	10%	0%
Norden	NCM 9:0.5:0.5	Gigafactory	0%	0%	40%	80%	90%	100%

Utslipp knyttet til produksjon av Li-ion batterier er basert på data fra LCA-studier av Li-ion batterier (Ellingsen *et al.*, 2014; Ellingsen, Singh and Strømman, 2016; Ellingsen, Hung and Strømman, 2017; Ellingsen, 2020).

I analysen er strømbruken ved fabrikken delt inn i tre kategorier: stor, stor moderne og gigafactory. Strømbruken per kg battericelle er størst i stor fabrikk og minst i gigafactory. For produksjon i Asia antok vi at strømforbruket ble møtt av en strømmiks med en konstant utslippsfaktor på 316 g CO₂-ekv./kWh, mens den nordiske strømmiksen ble brukt for produksjon i Norden, se detaljert info i vedlegg F. Ettersom utslippene knyttet til den nordiske strømmiksen går gradvis nedover mot 2050, gjør også utslippene fra battericelleproduksjon det også. Utslipp knyttet til produksjon av batteriinnpakking og termiske kontrollsystemer er modellert til å reduseres i takt med økt energitetthet, mens utslipp knyttet til batteristyringssystemer ble holdt konstant. Utslipp for batteriinnpakking, termiske kontrollsystemer og batteristyringssystemer er skalert og justert for å tilpasse størrelsen, økt energitetthet og batteridesign.



Vedleggsfigur 2 Utvikling av produksjonsutslipp for Li-ion batteripakker.

Ved endt bruk av kjøretøyet antas det at batteriene blir sendt til resirkulering for avhending. Det finnes flere forskjellige måter å behandle batteriene på, og det er ofte en kombinasjon av mekanisk separasjon, pyrometallurgisk behandling og hydrometallurgisk behandling. I analysen antok vi en kombinert pyro- og hydrometallurgisk behandlingsprosess fra *ecoinvent* databasen, som har en utslippsfaktor på 0,9 kg CO₂-ekv./kg batteri.

VEDLEGG C

Batterikjøretøy

Klimagassutslipp knyttet til batterilastebilene ble beregnet ved å først etablere passende lastebilspesifikasjoner og deretter fastsette utslippsfaktorer. Teksten under går gjennom hvilke betraktninger og antagelser som ble gjort i analysen.

I analysen ble det antatt at hel-elektrisk batterilastebil først blir brukt på den gitte strekningen i 2036. Ettersom det på dette tidspunktet er antatt at alle nye lastebiler er modulvogntog, antas det også at de batterielektriske lastebilene vil være modulvogntog.

For å estimere nødvendig batteristørrelse har vi tatt utgangspunkt i energibruk per kilometer. Basert på en kommende rapport utarbeidet av Concawe, har vi antatt at en batterielektrisk lastebil bruker omtrent halvparten så mye energi for fremdrift (MJ/km) som en diesellastebil. Videre har vi betraktet et overføringstap på 2% for lading av batteriet, noe som resulterte i 9.2 MJ/km, noe som tilsvarer 2.6 kWh/km. Ved å betrakte lengden på strekningen og en opplading underveis (sjåføren må uansett stoppe i minst 45 minutter i løpet av denne kjøreturen) og at 70% av nominell batterikapazität er tilgjengelig for bruk, oppnår vi en total batteripakke på 863 kWh.

Til sammenligning vil Renaults batterielektriske lastebil med bruttovekt 26 tonn ha et batteri på 265 kWh og ha en rekkevidde på 180 km (Renault, no date), noe som tilsvarer 1.5 kWh/km, og Scania en lastebil med bruttovekt på 29 tonn med 300 kWh batteripakke og rekkevidde på 250 kWh (Scania, no date), tilsvarende 1.3 kWh/km. Bruttovektene til lastebilene inkluderer vekten på kjøretøyet og lasten. Ettersom dette er lastebiler med betraktelig lavere bruttovekt på 26 og 29 tonn, så anses det høyere energiforbruk på 2.6 kWh/km og større batteripakke på 863 kWh for modulvogntoget med sine 60 tonn som passende estimer.

Vi antok at battericellene som ble brukt i 2036 var Li-ion celler med en volumetrisk energitetthet 1000 Wh/l og gravimetrisk energitetthet på 350 Wh/g. Videre antok vi at den volumetriske energitettheten holdt seg konstant frem til 2050, mens den gravimetriske energitettheten øker lineært opp til 500 Wh/kg frem mot 2050.

Ettersom produksjon for batteri-elektrisk modulvogntog er antatt å starte først i 2036, er det kun battericeller fra nordisk gigafactory som er brukt i modelleringen av batteriene for disse modulvogntogene. For estimering av utslipp knyttet til energibruk i battericelleproduksjon har vi derfor antatt lavere strømbruk og nordisk strømmiks. Utslippsutvikling av batteriproduksjon for disse batteriene er vist i Vedleggsfigur 2 (årstallene 2036 til 2050). Merk at usikkerheten knyttet til disse utslippsestimatene må betraktes som høy.

VEDLEGG D

Kjøretøyenes energibruk

For å estimere MJ/tkm tok vi utgangspunkt i litteraturdata på energibruk per km. En finsk studie oppgir dieselbruk og lastekapasitet for 38-tonns, 42-tonns og 60-tonns lastebiler (Liimatainen and Nykänen, 2014). Vi beregnet dieselbruken for en 40-tonns lastebil ved å bruke middelveiden for en 38-tonns og en 42-tonns lastebil. Lastekapasiteten ble beregnet ihht. samme forutsetninger som for godstog, og det er antatt at en 40 tonns lastebil transporterer to TEU, og en 60-tonnslastebil tre TEU med en lastekapasitet på 9,2 tonn per TEU (Jernbanedirektoratet, 2019). Dieselbruk og lastekapasitet som antatt for diesellastebiler for 2020 er vist i Vedleggstabell 5.

Vedleggstabell 5 Dieselbruk og lastekapasitet for diesellastebilene

Lastebilsstørrelse	Dieselbruk (l/100km)	Utnyttelse av lastekapasitet (tonn)
40-tonns	39,8	18,4
60-tonns	52,3	27,6

For å beregne energibruk for hydrogen- og batterilastebilene antok vi at de hadde et energiforbruk på henholdsvis 73% og 52% av det diesellastebilene hadde. I tillegg la vi til 2% tap for tap ved lading for batterilastebilen. Videre antok vi at energibruken gikk ned 11% fra 2020 til 2050 for diesellastebilene, 8% for hydrogenlastebilene og 6% for batterilastebilene.

Vi antok at hydrogendrevne lastebiler har ca. samme lastekapasitet som de som går på diesel. Dette er i samsvar med litteraturdata for en 44 tonns lastebil (Roland Berger, 2017). Basert på antatt volumetrisk energitetthet og estimat for 44 tonns batterilastebiler (Roland Berger, 2017), beregnet vi at det batterielektriske modulvogntoget vil har ca. 13% lavere lastekapasitet sammenlignet med diesel- og hydrogendrevne modulvogntog.

Basert på antakelser og beregninger beskrevet over ble energibruk per tonnkilometer (MJ/tkm) beregnet. Resultatet er vist i Figur 4 i del-kapittel 2.3.2 Energibruk (MJ/tkm).

VEDLEGG E

Hydrogenproduksjon

I analysen har vi antatt at hydrogen fra elektrolyse med nordisk strøm blir brukt i hydrogenlastebilene. Teksten under gjennomgår data og antakelser vi bruke for beregningen av utslippsfaktoren til hydrogen.

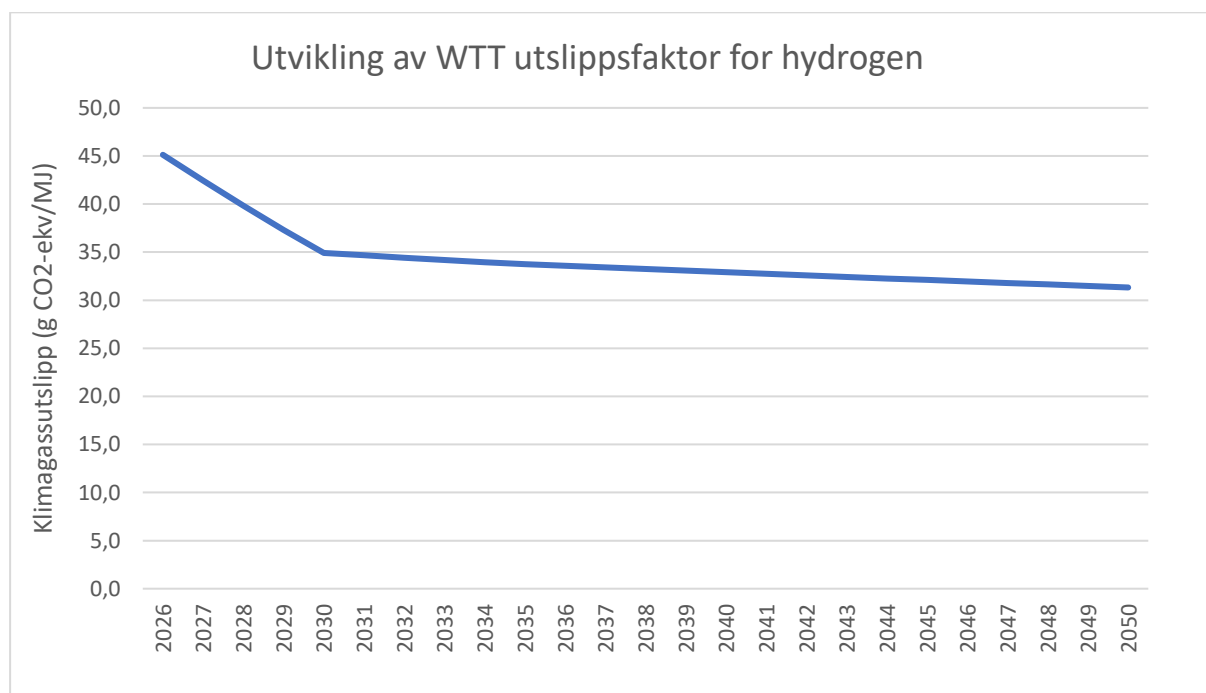
For å etablere en utslippsfaktor for hydrogen har vi tatt utgangspunkt i at hydrogen produseres i en elektrolyse ved bruk av 50 kWh/kg hydrogen Wulf and Kaltschmitt (2018). Med nedre brennverdi på 120.1 MJ/kg tilsvarer dette en energieffektivitet på 67%. Vi antok at energibruken via elektrolyse er konstant frem mot 2050.

Hydrogen som brukes i lastebil har et trykk på 350 bar, mens elektrolysen produserer hydrogen ved ca. 20 bar. Vi tok utgangspunkt i at isotermisk kompresjon av hydrogen fra 20 til 350 bar krever 3,5 kWh/kg hydrogen i 2025 og at det gradvis går nedover til 2,0 kWh/kg hydrogen i 2035, som det holder seg på frem til 2050. Energitalle er basert på estimer fra Department of Energy (Monterey Gardiner, 2009).

For utslipp knyttet til transport og distribusjon basert vi oss på Edwards *et al.*, 2014 som antar at hydrogenet transporteres 500 km fra produksjonslokasjon til fyllestasjon, og oppgir en utslippsfaktor på 1.1 gCO₂-ekv./MJ hydrogen.

For beregning av utslippsfaktor gitt i gCO₂-ekv./MJ har vi basert oss på overnevnt informasjon, nordisk strøm med lavspenning (Vedlegg F) og hydrogens nedrebrennverdi (120.1 MJ/kg).

Beregnet utvikling av WTT-utslippsfaktor for hydrogen er vist i Vedleggsfigur 3.



Vedleggsfigur 3 Utvikling av WTT-utslippsfaktor for hydrogen.

VEDLEGG F

Utslippsfaktor for nordisk strømmiks

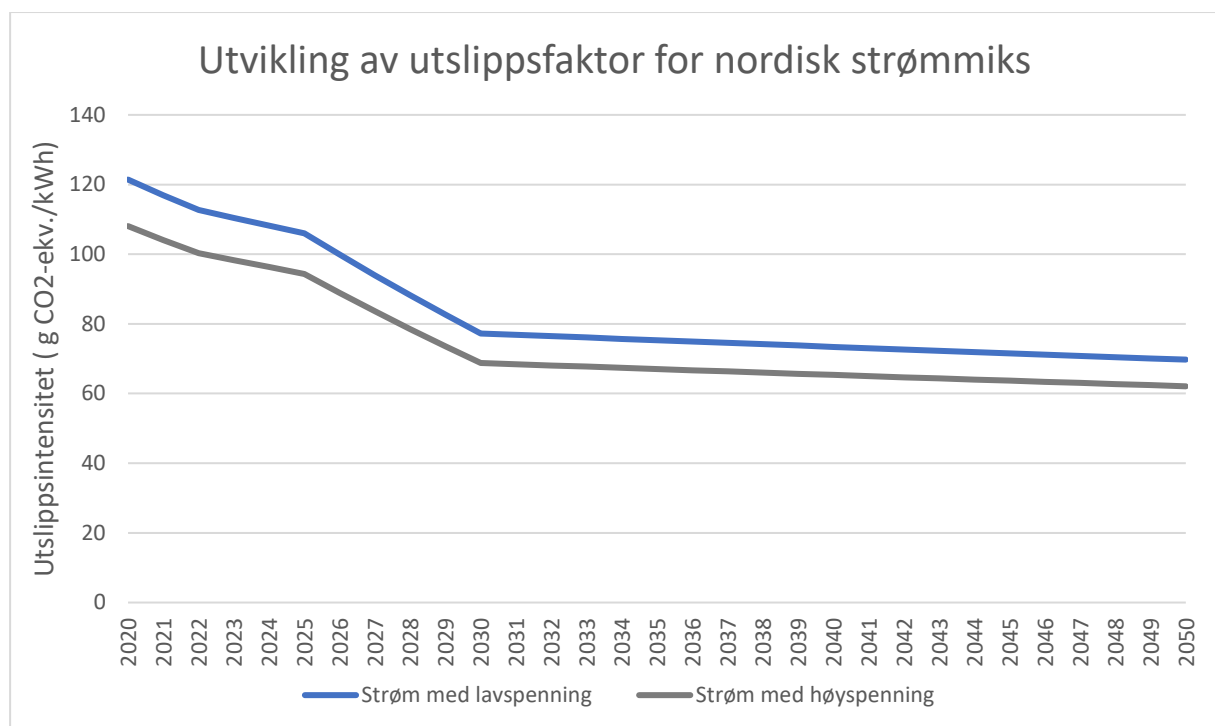
Beregning av dynamisk WTT-utslippsfaktor for nordisk strøm ble basert på estimerater av nordisk strømproduksjon og utslippsfaktorer for ulike energikilder, dette er videre beskrevet i teksten under.

Modelleringen av nordisk strøm ble basert data fra NVEs estimerater av nordisk strømproduksjon frem mot 2040 (NVE, 2019). Det ble videre gjort framskrivninger av nordisk strømmiks fra 2040 til 2050, basert på lineær ekstrapolasjon av NVE sine data for utviklingen mellom 2030 og 2040. Merk at det er store usikkerheter i estimeringen av nordisk strømmiks fra 2030 til og med 2050.

Utslippsfaktorer for forskjellige energikilder ble basert på tall fra IPCC (Bruckner et al., 2014) og tap knyttet til overføring og distribusjon. Tapene for strøm med lavspenning var antatt å ligge på 13,5%, og tapene for strøm med høyspenning var antatt å ligge på 1,02% i henhold til data i LCA-databasen *ecoinvent* (Ecoinvent Centre, 2019).

I studien er det forutsatt at godstogene bruke høyspent strøm, og at hydrogenlastebilene og batterielektriske lastebiler bruker lavspent strøm.

Estimerte utslippsfaktorer for nordisk strømmiks er vist i Vedleggsfigur 4.



Vedleggsfigur 4 Utvikling av utslippsfaktor for nordisk strøm.

VEDLEGG G

Vegutbygging på strekningen Oslo-Bergen

I LCA studiet er det ikke inkludert vegutbygging som følge av at all godsmengde flyttes over på veg. Dette vedlegget inkluderer grove estimer på potensielle vegutbygginger for å gi leseren en forståelse av hvilken størrelsesorden utslippene fra veg konstruksjon er, og hvordan de vil kunne påvirke resultatene i denne rapporten, men det er ikke gjort vurderinger av hvor realistisk et slikt scenario er.

Innføring av modulvogntog på strekningen mellom Oslo og Bergen kan potensielt utløse et behov for utbedring av dagens veginfrastruktur. En slik utbygning vil kunne medføre konstruksjon av en ekstra 2-feltsveg på deler av strekningen, og fører til en klimabelastningen på 1447 tonn CO₂-ekv. per kilometer 2-feltsveg. I tillegg vil utslipp fra konstruksjon og utbedring av tunneler øke dette estimatet betydelig. Klimabelastningen må også allokere mellom persontransport og godstransport for å kunne inkluderes som et bidrag i resultatene som er vist for scenario 2 i denne rapporten. Potensielle virkninger av en slik vegutbygging som følge av endret energibruk og endring i transportomfang er ikke inkludert i studiet.

Potensielt kan modulvogntogene utløse utbygging av E134 som en ny hovedvei mellom Østlandet og Vestlandet, og rapporten fra Nye Veier viser at det er vurdert å bruke 37 milliarder kroner på dette (NyeVeier, 2020). I dette LCA-studiet er det ikke gjort detaljerte vurderinger av tiltakene som er skissert opp i Nye Veier, og dette vil kreve en ny livsløpsvurdering.

VEDLEGG H

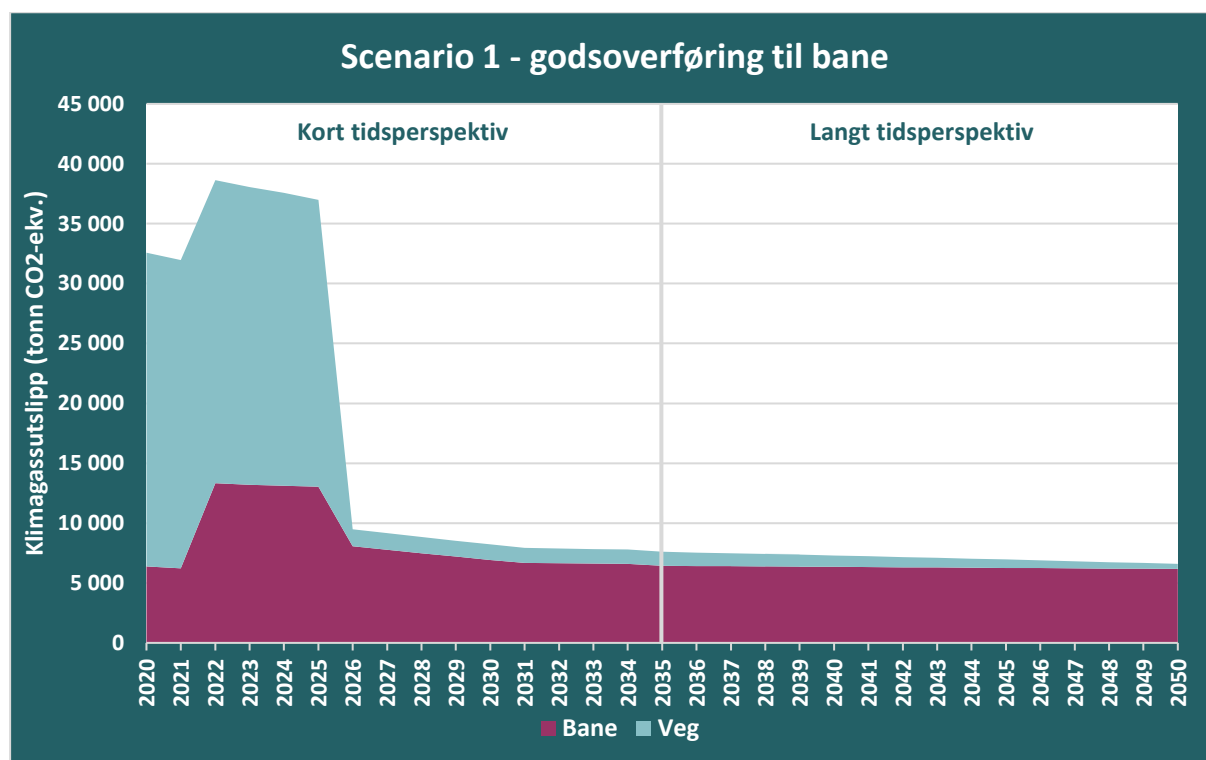
Årlige klimagassutslipp for scenario 1 og 2

I rapporten er resultatene fremstilt som klimaeffekten av tiltakene ved hvert scenario. For å beregne klimaeffekten ble de årlige klimagassutslippene for begge scenarioene beregnet for en gitt godsmengde basert på data for perioden 2015-2017. I tillegg ble et referansescenario modellert for å inkludere dagens situasjon uten godsoverføring. For å få et komplett bilde av klimagassutslippene ble både direkte og indirekte utslipp inkludert. Under vises de årlige klimagassutslippene som er underlaget for resultatene som presenteres i rapporten. I denne omtalen forutsettes det at de totale godsmengdene videreføres på nivået de var i 2015–2017.

Scenario 1 – overføring til bane

Scenario 1 betrakter en 50% økning av godstransport på bane som følge av utbygging frem mot 2025. Frem til og med 2025 antas det at den årlige godstransporten vil ligge konstant på 1,3 millioner tonn via bane, og at økningen trer i kraft fra 2026. Tiltaket fører til at den årlige godstransporten via veg på 0,7 millioner tonn reduseres med 0,66 millioner tonn. Scenarioet betrakter klimagassutslipp knyttet til omlegging fra 450 m til 620 m godstog, og nødvendig utbygging av kryssningsspor og godsterminaler i Bergen og Alnabru.

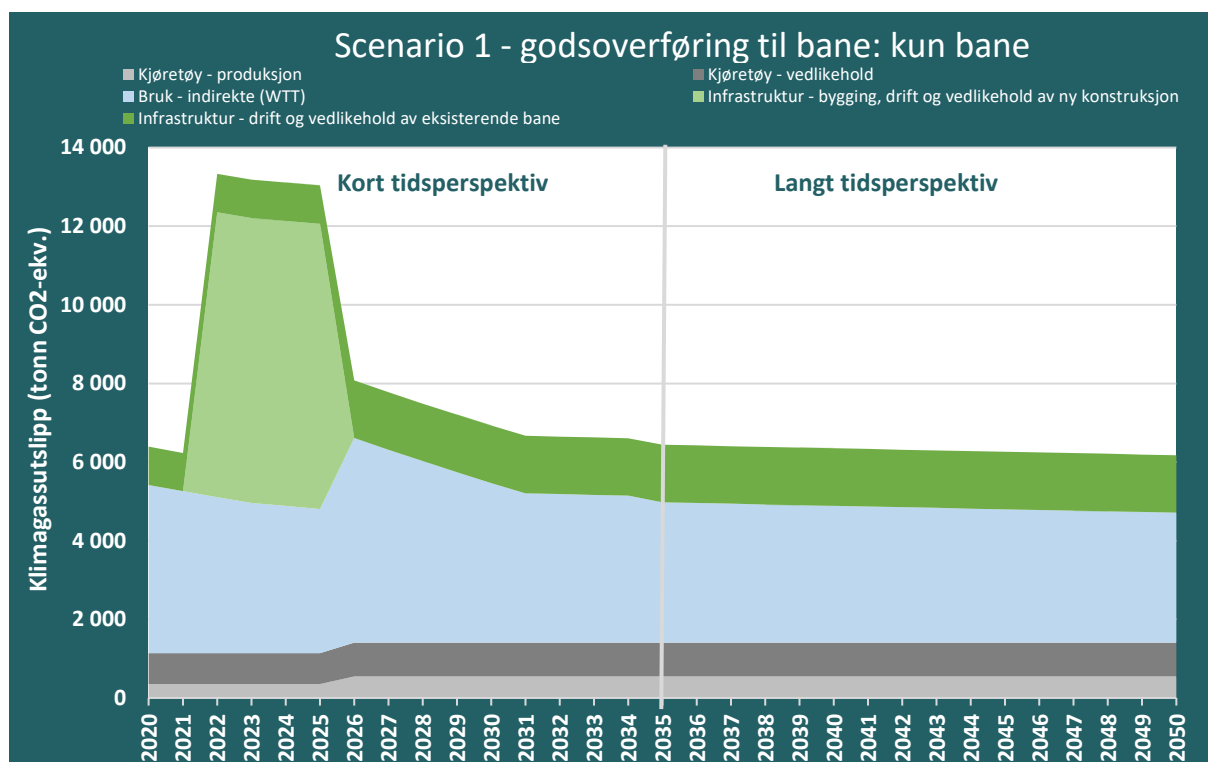
Vedleggsfigur 5 viser utviklingen av årlige klimagassutslipp for scenarioet i et kort- og langt tidsperspektiv. I 2020 er de totale årlige klimagassutslippene 32 000 tonn CO₂-ekv., og dette reduseres betydelig fram til 2050.



Vedleggsfigur 5 Utvikling av klimagassutslipp for scenario 1 i et kort- og langt tidsperspektiv.

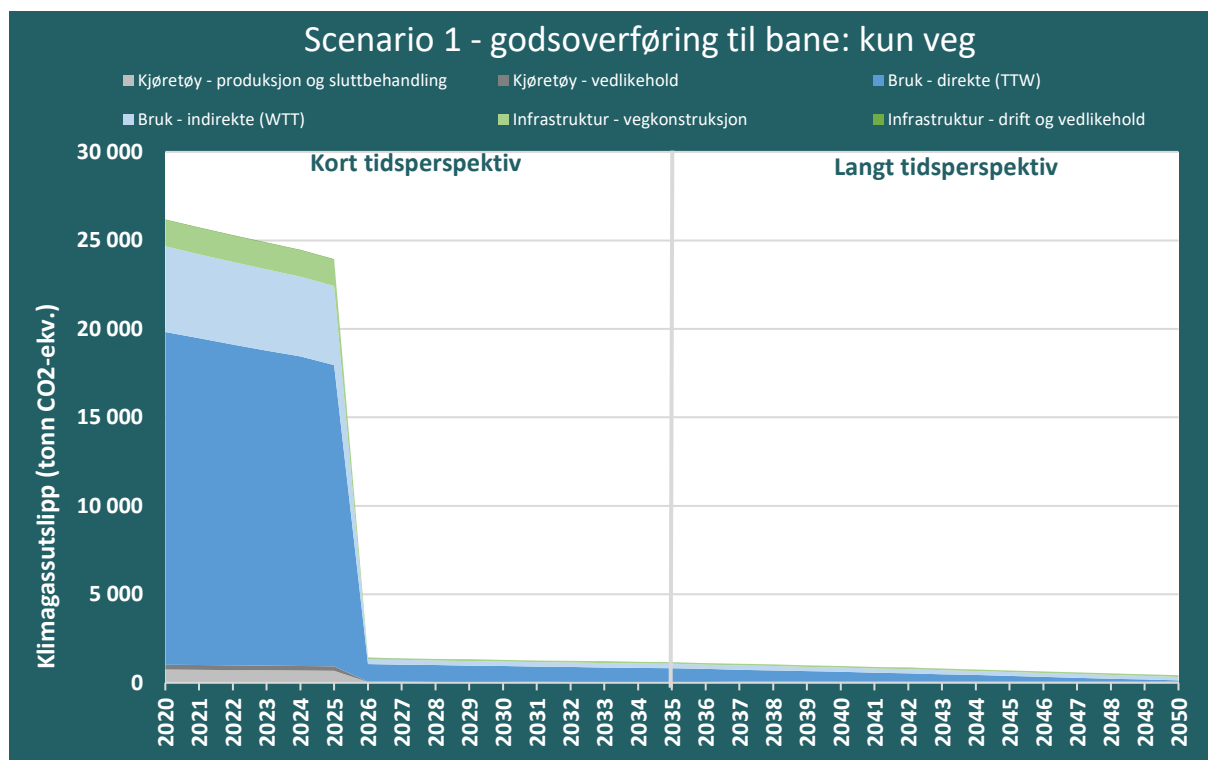
Vedleggsfigur 6 viser detaljert utvikling i klimagassutslipp knyttet til godstransport via bane for scenario 1. Det investeres i moderniseringen og ombygging av godsterminalene som utgjør en betydelig del da dette er beregnet som punktutslipp i byggeårene 2022 til 2025, og dette bidrar til at de årlige utslippene går betydelig opp i den periode. Fra 2026 økes klimagassutslippene fra

energiforbruket som følge av at økt godsmengde blir transportert via bane, men det reduseres over tid som følge av lavere utslippsintensitet for den nordiske strømmiksen og lavere strømtap.



Vedleggsfigur 6 Utvikling i årlige klimagassutslipp for jernbanen i scenario 1 som følge av at en del av godsmengden overføres til bane.

Vedleggsfigur 7 viser detaljert utvikling i klimagassutslipp knyttet til godstransport via veg i scenario 1. Som følge av 50% godsoverføring fra veg til jernbane reduseres godsmengden som fraktes via veg betraktelig, og klimagassutslippene reduseres som følge av dette.

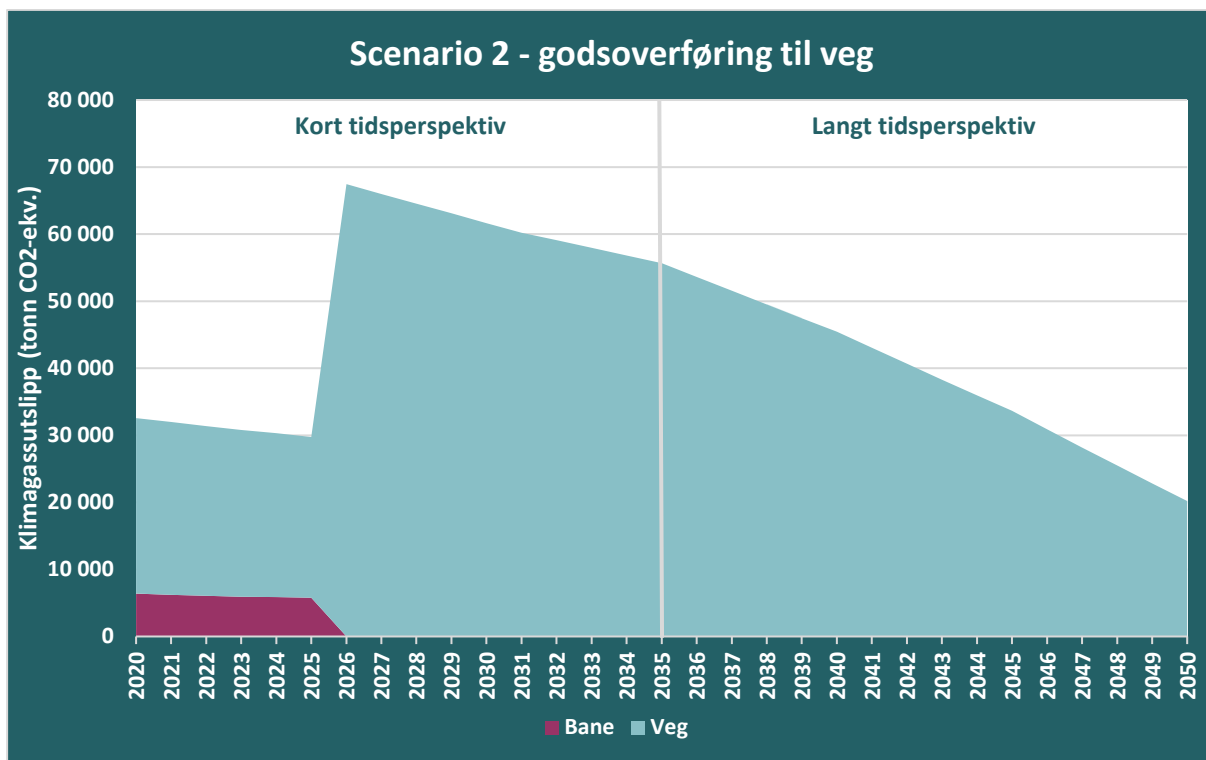


Vedleggsfigur 7 Utvikling i årlige klimagassutslipp for godstransport via veg som følge av at godsmengden overføres til bane i 2026.

Scenario 2 – godsoverføring til veg

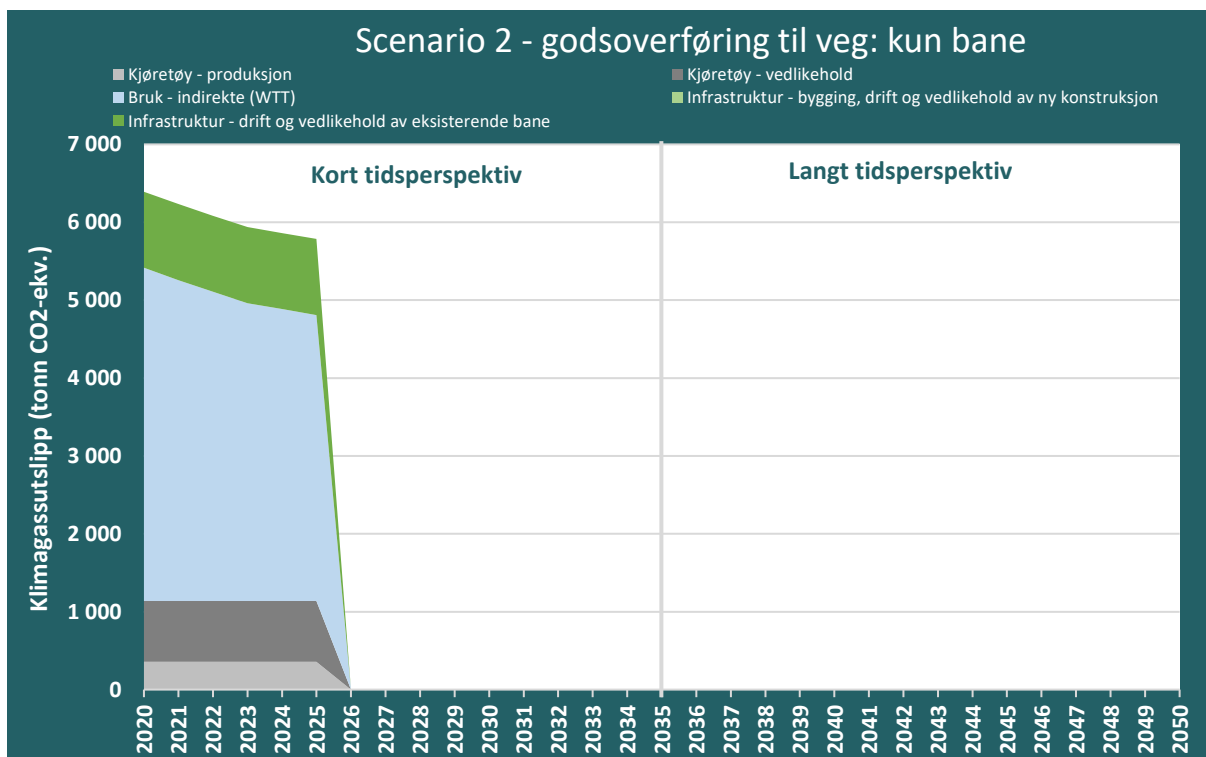
Scenario 2 betrakter en 100% godsoverføring fra bane til veg fra og med 2026. I dette scenariet vil det årlig transporteres 1,3 millioner tonn via bane frem til og med 2025, men ikke noe fra og med 2026. Dette medfører at den årlige transportmengden på veg øker med 1,3 millioner tonn fra og med 2026. Beregningene betrakter ikke hvorvidt ny utbygning av veginfrastruktur vil være nødvendig som følge av økte godstransport via veg. Potensielle utslipp knyttet til ny veg konstruksjon, drift, vedlikehold og avhending er ikke inkludert. For bane vil ikke nye typer togsett tas i bruk, og ingen ny baneinfrastruktur vil bygges frem til 2026.

Vedleggsfigur 8 viser utviklingen av årlige klimagassutslipp for scenarioet i et kort- og langt tidsperspektiv. Fra figuren ser man at det skjer en betydelig økning i de årlige klimagassutslippene for godstransport på veg fra 2026, dette skyldes at alt av gods på bane flyttes over på veg.



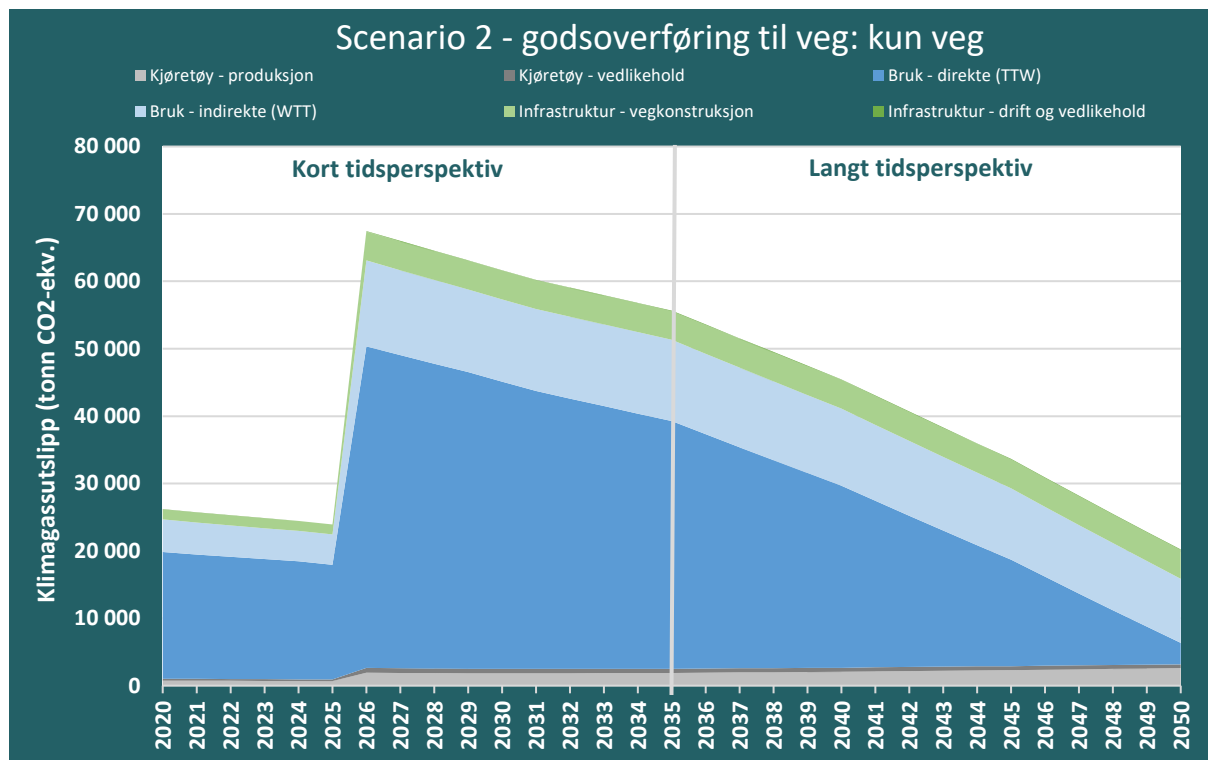
Vedleggsfigur 8 Utvikling av klimagassutslipp for scenario 2 i et kort- og langt tidsperspektiv.

Vedleggsfigur 9 viser detaljert utvikling i klimagassutslipp knyttet til godstransport via bane i scenario 2. I og med at all godstransport via bane legges ned forsvinner klimagassutslippene knyttet til godstransport fra og med 2026.



Vedleggsfigur 9 Utvikling i årlige klimagassutslipp for jernbanen i scenario 2 som følge av at godsmengden på bane flyttes over på veg.

Vedleggsfigur 10 viser detaljert utvikling i klimagassutslipp knyttet til godstransport via veg i scenario 2. Som følge av at all godstransport som ble fraktet via bane flyttes over på veg fra og med 2026 ser man betydelig økning i klimagassutslipp fra 2025 til 2026. Det er hovedsakelig de direkte og indirekte utslippene som øker, og dette følger i stor grad den antatte utviklingen av lastebilflåten.

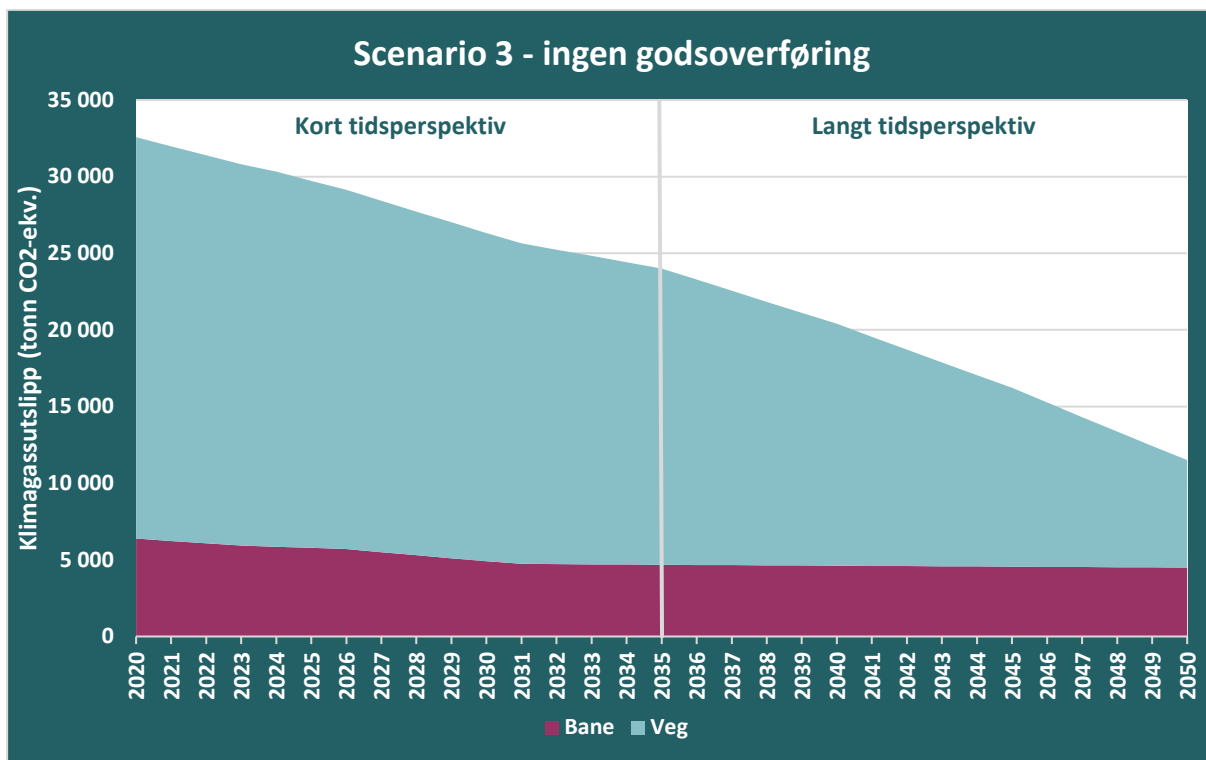


Vedleggsfigur 10 Utvikling i årlige klimagassutslipp for godstransport via veg i scenario 2.

Referansescenario

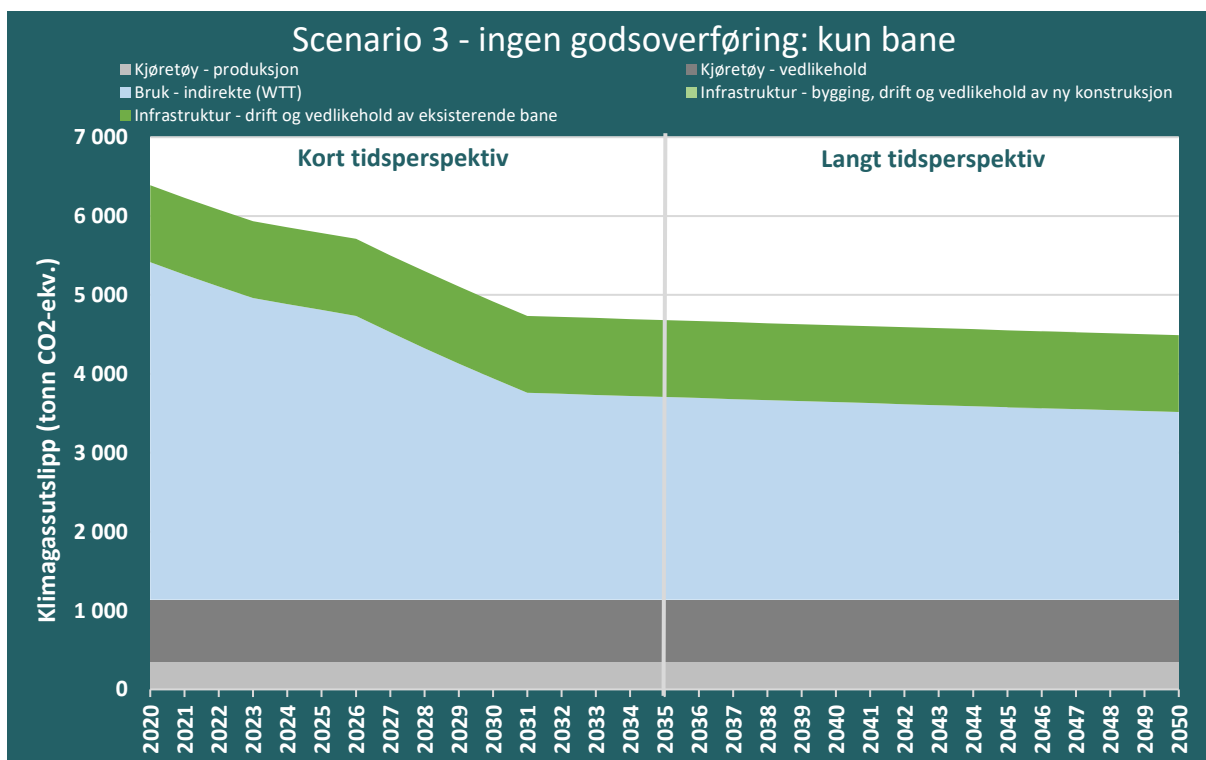
Scenario 3 er et referansescenario som betrakter et utslippsbilde der det ikke gjøres noen godsoverføring mellom bane og veg. Scenariet betrakter altså at årlig godsmengde via bane og veg holdes lik som for tidsperioden 2015-2017, på henholdsvis 1,3 millioner og 0,7 millioner tonn. Dermed skyldes endringen i utslipp kun endringen knyttet til teknologien. Scenariet tar ikke for seg utslipp knyttet til nye godsterminaler eller bane- eller vegutbygging. Teknologien for bane vil ikke endres da dagens bane ikke er tilpasset 620m tog. Scenariet viser dermed et referansepunkt for dagens situasjon og forventet utvikling uten tiltak.

Vedleggsfigur 11 viser overordnet utviklingen av årlige klimagassutslipp for scenarioet i et kort- og langt tidsperspektiv. Ut fra resultatene ser man hovedsakelig en reduksjon av klimagassutslipp fra godstransport på veg, og en minimal endring i godstransport på bane.



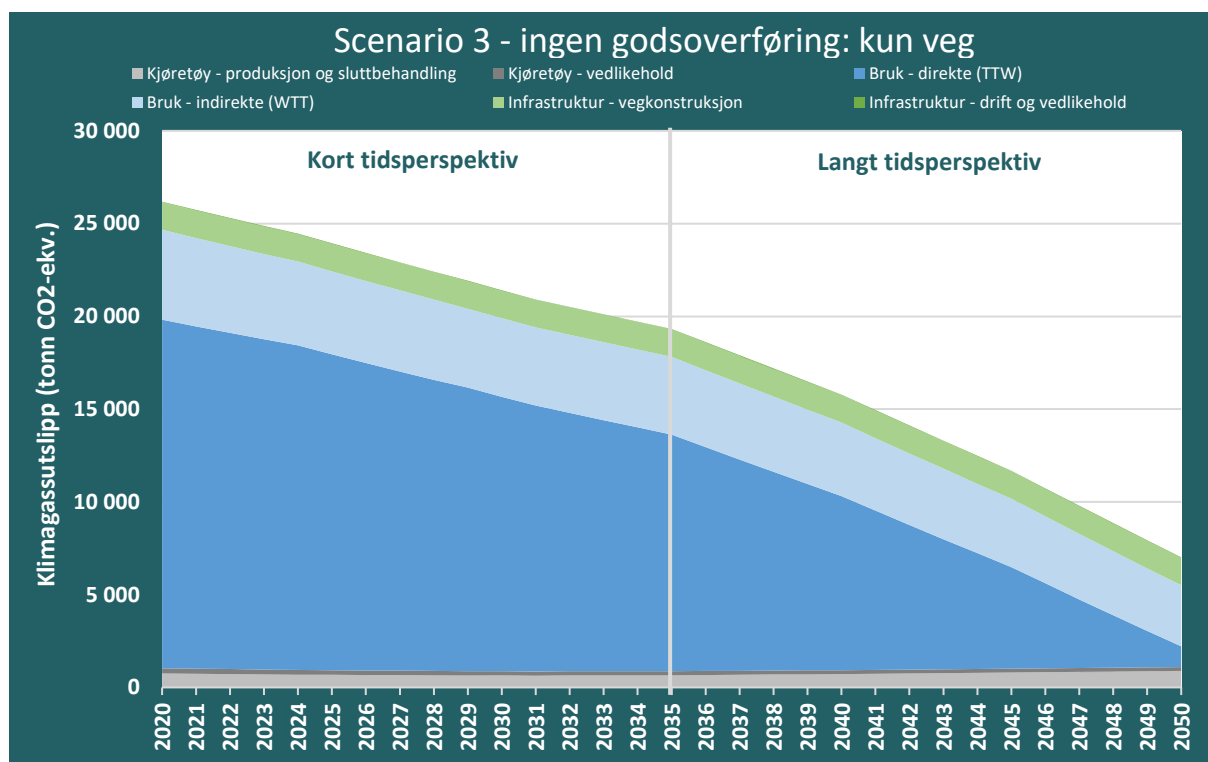
Vedleggsfigur 11 Utvikling av klimagassutslipp for scenario 3 i et kort- og langt tidsperspektiv.

Vedleggsfigur 12 viser detaljert utvikling i klimagassutslipp knyttet til godstransport via bane i scenario 3. Det er hovedsakelig de indirekte utslippene knyttet til strømforbruket som reduseres, fra 2020 til 2030. Fra 2030 til 2050 holder de årlige klimagassutslippene seg stabilt.



Vedleggsfigur 12 Utvikling i årlige klimagassutslipp for jernbanen i scenario 3 som følge av at dagens situasjon opprettholdes.

Vedleggsfigur 13 viser detaljert utvikling i klimagassutslipp knyttet til godstransport via veg i scenario 3 der dagens situasjon opprettholdes og reduksjonene i klimagassutslipp er som følge av teknologiutvikling i modulvogntogene. Resultatene viser at det er hovedsakelig de direkte klimagassutslippene knyttet til drivstoff-forbruket som reduseres.



Vedleggsfigur 13 Utvikling i årlige klimagassutslipp for godstransport via veg i scenario 3.

VEDLEGG I

Estimerte utslippsfaktorer

Estimerte utslippsfaktorer, oppgitt i gram CO₂-ekv. per tonnkilometer, godstransport mellom Alnabru og Bergen ved de ulike transport teknologiene er oppsummert i Vedleggstabell 6. Utslippsfaktoren inkluderer alle direkte og indirekte utslipp knyttet til godstransport for studien, men ikke nye investeringer i infrastruktur. Som det fremgår av rapporten skjer det en gradvis innfasing og utfasing av de forskjellige teknologiene, og i de tidsperiodene der teknologien ikke er i bruk er utslippsfaktoren ikke estimert.

Vedleggstabell 6 Oversikt over estimerte utslippsfaktorer per tonn-kilometer godstransport med ulike transport teknologier mellom Alnabru og Bergen, oppgitt i g CO₂-ekv./tkm.

Transport	2021	2026	2036	2050
Godstog, 450 m	10	9	8	7
Godstog, 620 m	-	9	7	7
Lastbil, diesel 40 tonn	79	76	-	-
Lastbil, diesel 60 tonn	71	69	65	60
Lastebil, hydrogen 40 tonn	-	33	25	-
Lastebil, hydrogen 60 tonn	-	-	23	21
Lastebil, batteri-elektrisk 60 tonn	-	-	17	15