



Transportøkonomisk institutt
Stiftelsen Norsk senter for samferdselsforskning

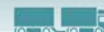
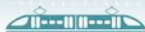


Eksterne kostnader ved jernbanetransport

Oppdaterte estimater av marginale skadekostnader -
2025

Kenneth Løvold Rødseth, Paal Brevik Wangsness, Knut Veisten,
Lana Krehic, Alena Katarina Høye, Andreas Dypvik Landmark,
Gunn Marit Aasvang, Pham Minh Nhat

2126/2025



Tittel:	Eksterne kostnader ved jernbanetransport - Oppdaterte estimater av marginale skadekostnader - 2025
Tittel engelsk:	External cost of rail transport - An update of marginal damage cost estimates - 2025
Forfatter:	Kenneth Løvold Rødseth, Paal Brevik Wangsness, Knut Veisten, Lana Krehic, Alena Katarina Høye, Andreas Dypvik Landmark, Gunn Marit Aasvang, Pham Minh Nhat
Dato:	12.2025
TØI-rapport:	2126/2025
Antall sider:	108
ISSN elektronisk:	2535-5104
ISBN elektronisk:	978-82-480-1823-0
Finansieringskilder:	Jernbanedirektoratet
TØIs p.nr.:	5620 – BANEKOST
Prosjektleder:	Kenneth Løvold Rødseth
Kvalitetsansvarlig:	Kjell W. Johansen
Ferdigstilling:	Trude Kvalsvik
Fagfelt:	Samfunnsøkonomiske analyser
Emneord:	Skadekostnader, Utslipp til luft, Støy, Ulykker, Slitasjekostnader

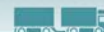
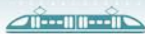
Kort sammendrag

Denne rapporten oppdaterer beregninger av de eksterne kostnadene ved jernbanetransport – det vil si skadekostnader som følge av utslipp, støy, ulykker og infrastrukturslitasje. Selv om transport er essensielt for samfunnet, kan samfunnsnyttens økes om man tilpasser seg i henhold til skadekostnadene ved transport. Formålet er å gi et bedre grunnlag for politiske beslutninger og samfunnsøkonomiske analyser. De nye beregningene bygger på data om drivstoffbruk, utslipp, støy, ulykkestatistikk og infrastrukturslitasje og nye metoder som gir mer presise anslag enn tidligere. Vi fokuserer på marginale skadekostnader, dvs. kostnad per togkilometer. Disse varierer mye ut fra hvorvidt toget kjører i spredtbygde strøk eller i byer. I byer hvor flere mennesker eksponeres for støy og eventuell lokal luftforurensing fra dieseltog er marginale skadekostnader høyere. Støykostnaden varierer også ut fra tid på døgnet, med vesentlig høyere kostnader om natten. Ettersom meste parten av togkilometerne foregår i spredtbygde strøk og på dagtid, viser resultatene at infrastrukturslitasje utgjør den største komponenten av samlede marginale skadekostnader.

Summary

This report updates the estimates of the external costs of rail transport—that is, the damage costs associated with emissions, noise, accidents, and infrastructure wear. Although transport is essential to society, overall welfare can be improved when decisions take damage costs into account. The purpose of the report is to provide a stronger basis for policy decisions and cost–benefit analyses. The new estimates draw on data on fuel consumption, emissions, noise, accident statistics, and infrastructure wear, as well as new methods that yield more precise estimates than previously. We focus on marginal damage costs, i.e. the cost per train-kilometer. These vary substantially depending on whether the train operates in sparsely populated areas or in urban environments. In cities, where more people are exposed to noise and potential local air pollution from diesel trains, marginal damage costs are higher. Noise costs also vary by time of day, with significantly higher costs during the night. Since most train-kilometres occur in sparsely populated areas and during daytime, the results show that infrastructure wear constitutes the largest component of total marginal damage costs.

Transportøkonomisk institutt (TØI) har opphavsrett til hele rapporten og dens enkelte deler. Innholdet kan brukes som underlagsmateriale. Når rapporten siteres eller omtales, skal TØI oppgis som kilde med navn og rapportnummer. Rapporten kan ikke endres. Ved eventuell annen bruk må forhåndssamtykke fra TØI innhentes. For øvrig gjelder [Åndsverklovens](#) bestemmelser.



Forord

Jernbanedirektoratet benytter marginale skadekostnader fra en tidligere rapport fra **Transportøkonomisk institutt (TØI)**, skrevet av Rødseth mfl. (2019), til sine konsekvensutredninger. Oppdragsgivers egne studier har avdekket at rapportens estimater av dieselforbruk og marginale slitasjekostnader begynner å bli utdaterte bl.a. som følge av teknologiutviklingen og endringer i logistikk-effektivitet. Oppdragsgiver ber derfor om vurderinger av utviklingstrekk som kan påvirke skadekostnader knyttet til transport på jernbane og tilhørende oppdaterte marginale skadekostnader og relevante utslippsfaktorer knyttet til:

- Støy
- Lokale utslipp
- Globale utslipp
- Ulykker
- Infrastrukturslitasje

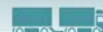
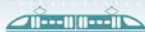
TØI, i samarbeid med underleverandørene **SINTEF Digital** og **Folkehelseinstituttet (FHI)**, har gjennomført omfattende analyser for å dekke Oppdragsgivers kunnskapsbehov. Analysene knyttet til globale og lokale utslipp er gjennomført av Paal Brevik Wangsness ved TØI, samt Gunn Marit Aasvang og Minh Nhat Pham ved FHI. Analysene knyttet til ulykker er gjennomført av Knut Veisten og Alena Høye ved TØI. Analysene knyttet til støy er gjennomført av Kenneth Løvold Rødseth og Lana Krehic ved TØI, Torbjørn Ursin og Stian Hope ved Bane NOR samt Gunn Marit Aasvang og Minh Nhat Pham ved FHI. Analysene knyttet til vedlikeholds- og fornyingskostnader forårsaket av infrastrukturslitasje er gjennomført av Kenneth Løvold Rødseth og Lana Krehic ved TØI, og Andreas Dypvik Landmark ved SINTEF. Paal Brevik Wangsness og Kenneth Løvold Rødseth har hatt det overordnede redaktøransvaret for rapporten. Sistnevnte har vært prosjektleder.

Våre primære kontaktpersoner på oppdragssiden har vært Mai Brit Svendsen, André Straith Amundsen og Mari Baklund Størseth. Vi har også hatt et godt samarbeid med Bane NOR (ved Marit Sæther Slåen, Torbjørn Ursin, Stian Hope, Hanne Kristine Lundby, Ella Veronica Tenmann Melsom og Thomas Benjamin Frogner), FHI (Erik Aune) og CargoNet (ved Sjur Holvik) knyttet til innhenting og bearbeiding av data. Vi takker Oppdragsgiver for et godt samarbeid under prosjektet, samt alle kommentarer og innspill underveis. Vi håper resultatene kommer til nytte for forskere og praktikere som jobber med dette og beslektete temaer.

Oslo, desember 2025
Transportøkonomisk institutt

Bjørne Grimsrud
Administrerende direktør

Kjell W. Johansen
Forskningssjef



Innhold

Sammendrag

Summary

Hvilke skadekostnader er gjennomgått.....	II
Estimater på marginale skadekostnader	III
Which damage costs are being considered?	i
New damage cost estimates.....	ii
1 Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn og formål.....	1
1.2 Avgrensning	1
1.3 Rapportstruktur	2
1.4 Ordforklaring.....	2
2 Eksterne kostnader – teori.....	3
2.1 Eksterne kostnader som markedssvikt	3
2.2 Bruk av avgifter til å forbedre samfunnsøkonomisk effektivitet	4
2.3 Hva betyr dette for nyttekostnadsanalyser	6
3 Utslipp til luft.....	7
3.1 Verdsetting per utslippsenhet	7
3.2 Utslipp til luft og skadekostnader per km fra dieseltog.....	15
3.3 Utslippskostnader for PM _{2.5} og NO ₂ for Trondheim og Bodø – metode fra Verdsettingsprosjektet.....	19
4 Ulykker	28
4.1 Eksterne kostnader av transportulykker.....	28
4.2 Metodevalg	28
4.3 Data.....	30
4.4 Resultater.....	44
4.5 Feilkilder/forbehold	47
5 Støy.....	49
5.1 Skadekostnader ved transport.....	49
5.2 Metodevalg	49
5.3 Data.....	53
5.4 Resultater	63
5.5 Sensitivitetstesting og sammenlikning med tidligere studier	64
6 Infrastrukturlitasje fra togtransport –vedlikeholdskostnader	67
6.1 Skadekostnader ved transport.....	67
6.2 Metodevalg	67
6.3 Data.....	71



6.4	Resultater	73
6.5	Anbefalinger	83
	Appendiks	86
7	Infrastrukturslitasje fra togtransport – fornyingskostnader	90
7.1	Marginal fornyingskostnad	90
7.2	Metodevalg	90
7.3	Resultater	91
7.4	Feilkilder/forbehold og anbefalinger	93
8	Sammenstilling av marginale skadekostnader	95
8.1	Sammenlikning med Rødseth mfl. (2020)	98
9	Konklusjon og diskusjon	100
9.1	Konklusjon	100
9.2	Diskusjon	101
9.3	Videre forskning	102
	Referanser	104

Eksterne kostnader ved jernbanetransport

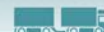
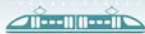
Oppdaterte estimater av marginale skadekostnader - 2025

TØI rapport 2126/2025 • Forfattere: Kenneth Løvold Rødseth, Paal Brevik Wangsness, Knut Veisten, Lana Krehic, Alena Katarina Høye, Andreas Dypvik Landmark, Gunn Marit Aasvang, Pham Minh Nhat • Oslo 2025 • 108 sider

Denne rapporten oppdaterer beregninger av de eksterne kostnadene ved jernbanetransport – det vil si skadekostnader som følge av utslipp, støy, ulykker og infrastrukturslitasje. Selv om transport er essensielt for samfunnet, kan samfunnsnyttene økes om man tilpasser seg utfra de eksterne kostnadene. Formålet til rapporten er å gi et bedre grunnlag for politiske beslutninger og samfunnsøkonomiske analyser. De nye beregningene bygger på oppdaterte data om drivstoffbruk, utslipp, støy, ulykkesstatistikk og infrastrukturslitasje, og nye metoder som gir mer presise anslag enn tidligere. Vi fokuserer på marginale skadekostnader, dvs. kostnad per togkilometer. Disse varierer mye utfra hvorvidt toget kjører i spredtbygde strøk eller i byer. I byer hvor flere mennesker eksponeres for støy og eventuell lokal luftforurensing fra dieseltog er marginale skadekostnader høyere. Støykostnaden varierer også utfra tid på døgnet, med vesentlig høyere kostnader om natten. Ettersom mesteparten av togkilometerne foregår i spredtbygde strøk og på dagtid, viser resultatene at infrastrukturslitasje utgjør den største komponenten av samlede marginale skadekostnader.

Transport er fundamentalt for at et samfunn skal fungere, og er dermed en nødvendig innsatsfaktor for samfunnets samlede velferd. Nytteverdien av transport er derfor svært høy, og dagens BNP-nivåer ville vært utenkelige uten et velfungerende transportsystem. Samtidig er transportmarkedet preget av markedssvikt: brukerne påfører andre aktører kostnader – såkalte skadekostnader – som de ikke tar hensyn til når de tar beslutninger. Når disse skadekostnadene ikke korrigeres for, gjennom f.eks. avgifter eller regulering kan man kalle dem for *eksterne kostnader*.

Selv om transport gir store samfunnsgevinster, gjør disse eksterne kostnadene at sektoren ikke utnytter sitt fulle potensial for å maksimere velferden. For å sikre en optimal utforming av infrastruktur, vedlikehold og andre transporttjenester, må skadekostnadene inngå i beslutningsgrunnlaget. Dette krever at de kvantifiseres, ofte som marginale skadekostnader per kjøretøykilometer. (dvs. *marginale* skadekostnader). Det samme kunnskapsgrunnlaget kan brukes til å utforme avgifter og reguleringer som sørger for at transportbrukerne blir nødt til å ta disse skadekostnadene innover seg i sine egne kalkyler. Da kan man si at skadekostnadene *internaliseres*, noe som vil bidra til samfunnsmessig mer effektiv ressursbruk.



Hvilke skadekostnader er gjennomgått

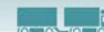
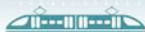
Denne rapporten presenterer oppdaterte estimater for marginale skadekostnader for jernbanetransport, for både person- og godstrafikk. Vi beregner skadekostnader knyttet til CO₂-utslipp, lokal luftforurensning, støy, ulykker samt slitasje på infrastruktur (vedlikehold og fornying), på lik linje med TØI-rapport 1704/2019 *Eksterne kostnader ved transport i Norge – Estimer av marginale skadekostnader for person- og godstransport* (Rødseth mfl., 2020), men med oppdatert datagrunnlag, noe metodeutvikling og realprisjusteringer. I likhet med TØI-rapport 1704/2019 fokuserer denne rapporten kun på skadekostnader i driftsfasen (dvs. under transport, ofte omtalt som tank-to-wheel), og behandler ikke skadekostnader oppstrøms i forsyningskjeden (eks. knyttet til produksjonen av drivstoff).

For skadekostnader knyttet til utslipp til luft er datagrunnlaget oppdatert for drivstofforbruk per togkilometer for dieseldrevne tog, samt for NO_x-utslipp per liter diesel. CO₂-kostnader er justert etter gjeldende karbonprisbaner, mens kostnader per enhet PM₁₀ og NO_x er oppdatert for realprisvekst og endret befolkningsgrunnlag. Vi har også inkludert to case-studier fra Folkehelseinstituttets Verdsettingsprosjekt omhandlende henholdsvis Trondheim og Bodø, to byer som har dieseltogstrekninger. Case-studiene tar for seg PM_{2,5} og NO₂ og et mer begrenset sett helseutfall og vurderes derfor ikke direkte sammenlignbare med dagens nasjonale oppsett, men de indikerer lavere marginale skadekostnader enn de nasjonale beregningene. Inntil Verdsettingsprosjektet ferdigstilles anbefaler vi å videreføre eksisterende verdier og supplere med følsomhetsanalyser med lavere verdier der lokale utslippskostnader kan være utslagsgivende.

For ulykkeskostnader er datagrunnlaget for personskader betydelig forbedret sammenliknet med tidligere analyser (Rødseth mfl., 2020), men metodikken følger samme tilnærming. Våre hovedberegninger omfatter godstog og persontog, og også «annet tog» (tomkjøring, etc.), samt differensiering mht. togulykke-typer. Vi fant klart høyest estimert eksternt marginal kostnad av personskade for «person-påkørsel», og deretter «motpartulykke-vegkjøretøy» og «sammenstøt-diverse». Vi finner at persontog har litt høyere marginale eksterne kostnader for personskader i ulykker, per kjøretøykm, enn godstog, men at «annet tog» har de klart høyeste marginale eksterne kostnadene. I personskadene tilknyttet «annet tog» inngår bl.a. et par større ulykker ved skifting som ledet til godstog-kollisjoner. Vi har også beregnet marginale eksterne kostnader tilknyttet persontog og godstog der bidrag fra «annet tog» er fordelt 50-50 mellom persontog og godstog.

Når det gjelder materielle skader i ulykker, så har vi brukt samme metodiske ramme som for personskader. Vi har også gjennomført en eksempelmanalyse som gir noenlunde samme årlige totale kostnadsestimater som det vi kunne utlede fra datasettet fra én av togoperatørene (Vy). Vi vil likevel vurdere estimatene for marginale eksterne kostnader av materielle skader i transportulykker som usikre. Vårt arbeid her utgjør ett bidrag som det kan bygges videre på.

For skadekostnader knyttet til støy har vi adressert flere svakheter ved metodikken brukt i Rødseth mfl. (2020). For det første har vi erstattet de stykkevis lineære enhetsprisene tidligere brukt til verdsetting med kontinuerlige funksjoner. For det andre har vi benyttet scenario-analyse med støyberegningsverktøyet Nord96 til å beregne endringer i støy ved bygningers fasade når togtrafikken endres med ett ekstra tog (det marginale toget), gods- eller persontog, på dag, kveld eller natt. Dette gjør oss i stand til å beregne endringer i støybelastning per husholdning mellom alternativ- og basisscenarioene. Til sammenligning benyttet metoden i TØI-rapport 1704 kun endring i utgangsstøy fra togene og tommelfingerregler til å anslå denne endringen. For det tredje, har denne studien gjort en grundig utvelgelse av case til analysen. Vi forventer derfor at beregningene vil være mer representative for den norske jernbanesektoren



enn casene brukt i Rødseth mfl. (2020). Vi finner at de nye resultatene gir generelt lavere marginale støykostnader enn beregningene i Rødseth mfl. (2020).

For skadekostnader knyttet til slitasjeeffekter på vedlikeholdskostnader, brukte Rødseth mfl. (2020) en tilpassing av studier fra Sverige til å beregne marginale kostnader knyttet til daglig vedlikehold. I den nye studien estimerer vi marginale slitasjekostnader gjennom å estimere en kostnadsfunksjon på et datasett med informasjon om baner i Norge. En grundig gjennomgang viser at en modellspesifikasjon med sporlengde og trafikk (målt i togkilometer) som kontrollerer for togenes attributter knyttet til akselvekt og hastighet gir troverdige og robuste estimater av marginale slitasjekostnader. Estimaten er økende i godsandel. Den valgte modellen gir høyere estimater av marginale slitasjekostnader enn estimatene Bane NOR benytter til beregning av kjøreveisavgiften, mens vektet gjennomsnittlig marginalkostnad ligger omtrent på nivå med beregningene til Rødseth mfl. (2020).

For fornyingskostnader finner vi at de oppdaterte beregningene av marginale fornyingskostnader ligger betydelig under de tilsvarende resultatene til Rødseth mfl. (2019). Vi understreker at dette ikke nødvendigvis innebærer at fornyingskostnadene reelt sett har falt. Begge studiene baserer seg på korte analyseperioder med begrenset data. Vi anbefaler derfor å tolke og bruke tallene med varsomhet og å søke å finne bedre metoder til beregning av marginale fornyingskostnader framover. Videre metodeutvikling bør utnytte datagrunnlaget i *Infrastatus* bedre, blant annet for å skille tydeligere mellom vedlikeholdsetterslep og reelt fornyingsbehov.

Estimater på marginale skadekostnader

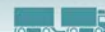
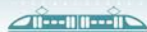
På samme måte som TØI-rapport 1704 er, denne rapporten først og fremst en dokumentasjonsrapport og et oppslagsverk for skadekostnadsestimater til bruk i samfunnsøkonomiske analyser i Norge. Denne oppdateringen i 2025 er avgrenset til jernbanetransport. Oppdragsgiver har også fått flere av tabellene i Excel-format for enkel videre bruk.

På grunn av at skadekostnadene knyttet til støy varierer mye utfra hvorvidt støyforurensingen finner sted på dagtid, kveldstid eller nattestid, vurderer vi det som nyttig å lage separate tabeller som skiller mellom tid på døgnet. De ulike tabellene vil passe til ulike typer analyser. Vi legger imidlertid vekt på resultatene knyttet til dagtid (**Feil! Fant ikke referansekilden.**), da dette både er det største tidsrommet og tidsrommet hvor mest transport finner sted. Tilsvarende tabeller for kveldstid og nattestid gis i henholdsvis

Tabell S 2 og Tabell S 3.

I sammenligningstabellene tar vi utgangspunkt i et «gjennomsnittlig» persontog og et «gjennomsnittlig» godstog (kombitog)¹, og skiller mellom elektrisk og dieselbasert fremdrift. Det vil naturligvis være variasjoner innad i disse gruppene, som kan hensyntas dersom analytikeren har denne informasjonen tilgjengelig. For eksempel vil lettere og kortere tog generelt bidra til mindre slitasje enn lengre og tyngre tog, og dersom det er dieseldrevet vil det også ha lavere dieselforbruk og utslipp. Videre benytter vi oss av gjennomsnittsestimater for marginale skadekostnader og slitasje knyttet til både vedlikeholdskostnader og fornyingskostnader. Det er vesentlige variasjoner mellom ulike regioner og strekninger. Dersom aktuelt, kan analytikeren benytte seg av regionsspesifikke estimater. Dette er også inkludert i Excel-arkene oversendt til Oppdragsgiver.

¹ Her forutsettes eksplisitt en bruttovekt på 1010 tonn og en lastvekt (utenom lastbærere) på 313 tonn.



Tabell S 1: Marginale skadekostnader for et «gjennomsnittlig» persontog og et «gjennomsnittlig» godstog (NOK₂₀₂₅ per kjøretøykilometer), dagtid (perioden 0700-1900 sett under ett).

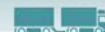
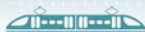
Togtype	Drivstoff	Områdetype	CO ₂	Lokale utslipp	Støy	Ulykker	Slitasje (Vedlikehold)	Slitasje (Fornyng)	SUM
Person	Elektrisk	Spredt bebyggelse	0,00	0,00	0,00	2,23	24,01	30,95	57,19
Person	Elektrisk	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	0,00	0,00	0,00	2,23	24,01	30,95	57,19
Person	Elektrisk	Tettsted (>100 000 innb.)	0,00	0,00	0,00	2,23	24,01	30,95	57,19
Gods	Elektrisk	Spredt bebyggelse	0,00	0,00	0,50	1,21	24,01	30,95	56,67
Gods	Elektrisk	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	0,00	0,00	1,30	1,21	24,01	30,95	57,47
Gods	Elektrisk	Tettsted (>100 000 innb.)	0,00	0,00	1,80	1,21	24,01	30,95	57,97
Person	Diesel	Spredt bebyggelse	6,42	1,06	0,00	2,23	24,01	30,95	64,67
Person	Diesel	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	6,42	7,40	0,00	2,23	24,01	30,95	71,00
Person	Diesel	Tettsted (>100 000 innb.)	6,42	45,36	0,00	2,23	24,01	30,95	108,97
Gods	Diesel	Spredt bebyggelse	19,15	3,17	0,50	1,21	24,01	30,95	78,99
Gods	Diesel	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	19,15	22,08	1,30	1,21	24,01	30,95	98,70
Gods	Diesel	Tettsted (>100 000 innb.)	19,15	135,38	1,80	1,21	24,01	30,95	212,50

Tabell S 2: Marginale skadekostnader for et «gjennomsnittlig» persontog og et «gjennomsnittlig» godstog (NOK₂₀₂₅ per kjøretøykilometer), kveld (perioden 1900-2300).

Togtype	Drivstoff	Områdetype	CO ₂	Lokale utslipp	Støy	Ulykker	Slitasje (Vedlikehold)	Slitasje (Fornyng)	SUM
Person	Elektrisk	Spredt bebyggelse	0,00	0,00	0,00	2,23	24,01	30,95	57,19
Person	Elektrisk	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	0,00	0,00	0,10	2,23	24,01	30,95	57,29
Person	Elektrisk	Tettsted (>100 000 innb.)	0,00	0,00	0,10	2,23	24,01	30,95	57,29
Gods	Elektrisk	Spredt bebyggelse	0,00	0,00	1,40	1,21	24,01	30,95	57,57
Gods	Elektrisk	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	0,00	0,00	4,20	1,21	24,01	30,95	60,37
Gods	Elektrisk	Tettsted (>100 000 innb.)	0,00	0,00	8,00	1,21	24,01	30,95	64,17
Person	Diesel	Spredt bebyggelse	6,42	1,06	0,00	2,23	24,01	30,95	64,67
Person	Diesel	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	6,42	7,40	0,10	2,23	24,01	30,95	71,10
Person	Diesel	Tettsted (>100 000 innb.)	6,42	45,36	0,10	2,23	24,01	30,95	109,07
Gods	Diesel	Spredt bebyggelse	19,15	3,17	1,40	1,21	24,01	30,95	79,89
Gods	Diesel	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	19,15	22,08	4,20	1,21	24,01	30,95	101,60
Gods	Diesel	Tettsted (>100 000 innb.)	19,15	135,38	8,00	1,21	24,01	30,95	218,70

Tabell S 3: Marginale skadekostnader for et «gjennomsnittlig» persontog og et «gjennomsnittlig» godstog (NOK₂₀₂₅ per kjøretøykilometer), natt (perioden 2300-0700).

Togtype	Drivstoff	Områdetype	CO ₂	Lokale utslipp	Støy	Ulykker	Slitasje (Vedlikehold)	Slitasje (Fornyng)	SUM
Person	Elektrisk	Spredt bebyggelse	0,00	0,00	1,60	2,23	24,01	30,95	58,79
Person	Elektrisk	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	0,00	0,00	1,00	2,23	24,01	30,95	58,19
Person	Elektrisk	Tettsted (>100 000 innb.)	0,00	0,00	2,70	2,23	24,01	30,95	59,89
Gods	Elektrisk	Spredt bebyggelse	0,00	0,00	21,20	1,21	24,01	30,95	77,37
Gods	Elektrisk	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	0,00	0,00	68,80	1,21	24,01	30,95	124,97
Gods	Elektrisk	Tettsted (>100 000 innb.)	0,00	0,00	119,80	1,21	24,01	30,95	175,97
Person	Diesel	Spredt bebyggelse	6,42	1,06	1,60	2,23	24,01	30,95	66,27
Person	Diesel	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	6,42	7,40	1,00	2,23	24,01	30,95	72,00
Person	Diesel	Tettsted (>100 000 innb.)	6,42	45,36	2,70	2,23	24,01	30,95	111,67
Gods	Diesel	Spredt bebyggelse	19,15	3,17	21,20	1,21	24,01	30,95	99,69
Gods	Diesel	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	19,15	22,08	68,80	1,21	24,01	30,95	166,20
Gods	Diesel	Tettsted (>100 000 innb.)	19,15	135,38	119,80	1,21	24,01	30,95	330,50



For å summere opp kostnader per tonnkilometer for et gjennomsnittlig godstog samler vi sammen beregningene for dagtid, kveldstid og nattestid i Tabell S 4. Her forutsettes eksplisitt en bruttovekt på 1010 tonn og en lastvekt (utenom lastbærere) på 313 tonn.

Tabell S 4: Marginale skadekostnader (NOK₂₀₂₅ per tonnkilometer) for gjennomsnittlig godstog (kombitog), for ulike områdetyper og tider på døgnet.

Drivstoff	Områdetype	Tid på døgnet	SUM per kjøretøykm	SUM per tonnkm
Elektrisk	Spredt bebyggelse	Dag	56,67	0,18
Elektrisk	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	Dag	57,47	0,18
Elektrisk	Tettsted (>100 000 innb.)	Dag	57,97	0,19
Diesel	Spredt bebyggelse	Dag	78,99	0,25
Diesel	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	Dag	98,70	0,32
Diesel	Tettsted (>100 000 innb.)	Dag	212,50	0,68
Elektrisk	Spredt bebyggelse	Kveld	57,57	0,18
Elektrisk	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	Kveld	60,37	0,19
Elektrisk	Tettsted (>100 000 innb.)	Kveld	64,17	0,21
Diesel	Spredt bebyggelse	Kveld	79,89	0,26
Diesel	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	Kveld	101,60	0,32
Diesel	Tettsted (>100 000 innb.)	Kveld	218,70	0,70
Elektrisk	Spredt bebyggelse	Natt	77,37	0,25
Elektrisk	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	Natt	124,97	0,40
Elektrisk	Tettsted (>100 000 innb.)	Natt	175,97	0,56
Diesel	Spredt bebyggelse	Natt	99,69	0,32
Diesel	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	Natt	166,20	0,53
Diesel	Tettsted (>100 000 innb.)	Natt	330,50	1,06

External cost of rail transport

An update of marginal damage cost estimates - 2025

TØI Report 2126/2025 • Authors: Kenneth Løvold Rødseth, Paal Brevik Wangsness, Knut Veisten, Lana Krehic, Alena Katarina Høye, Andreas Dypvik Landmark, Gunn Marit Aasvang, Pham Minh Nhat • Oslo 2025 • 108 pages

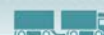
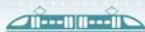
This report presents new estimates of the external costs of rail transport – i.e., damage costs caused by emissions, noise, accidents and infrastructure wear and tear. While transport generates societal benefits, welfare can be increased if associated damage costs are taken into consideration when transport decisions are made. The purpose of this report is to provide better foundations for political decisions and cost-benefit analysis in the transport sector. The new estimates utilize data on fuel use, emissions, noise, accident statistics and infrastructure wear and tear and employ novel methods that provide more precise estimates than those of comparable studies. We focus on marginal damage costs, i.e. the cost per train kilometer. They vary substantially, depending on whether the train is being operated in sparsely populated areas or in cities. In areas where more people are exposed to noise and local air pollution from diesel trains, marginal damage costs are higher. The societal cost of transport noise varies by time of day, with significantly higher costs at night. As most train kilometers in Norway are operated in sparsely populated areas and during the day, the results show that infrastructure wear and tear constitutes the largest component of marginal damage costs.

Transport is essential for a modern society, and welfare gains from transport are vast. At the same time, the transport market is characterized by market failure: transport users impose costs on other actors – so-called damage costs – that they do not internalize in their decision making. When damage costs are left unchecked, such as in the absence of corrective taxes or regulation, they are dubbed external costs. The presence of external costs means that the transport sector does not exploit its full potential to maximize welfare.

To ensure an optimal design of infrastructure, maintenance and other transport services, damage costs must be quantified. These estimates can be used to design fees and regulations to ensure that users account for their damage costs when making transport decisions. In this way, damage costs are internalized, which contributes to more efficient use of resources.

Which damage costs are being considered?

This report presents estimates of marginal damage costs associated with rail transport, covering both passenger and freight trains. In line with TØI report 1704/2019 External costs of transport in Norway – Estimates of marginal damage costs for passenger and freight transport (Rødseth et al., 2020), this report presents damage costs related to CO₂ emissions, local air



pollution, noise, accidents and wear and tear on infrastructure (maintenance and renewal). Advances stem from the use of new data, some methodological developments and real price adjustments. Like TØI report 1704/2019, the current report focuses on damage costs that occur in the operational phase (i.e., during transport, often dubbed tank-to-wheel), and does not consider damage costs occurring upstream in the supply chain (e.g. related to the production of fuel).

New damage cost estimates

Similar to TØI report 1704, this report provides methodological documentation and functions as a reference work for damage cost estimates for transport cost-benefit analysis in Norway. The current update is delimited to rail transport.

Because the societal costs of noise pollution differ for transport during the day, evening and night, we present results tables that distinguish between the time of day. The different tables suit different types of analyzes. However, we emphasize the results associated with the daytime (Table S 1), since this is when the majority of transport activities take place. Corresponding tables for damage costs of rail transport during the evening and at night are provided by Table S 2 and Table S 3, respectively. We consider “average” passenger and freight trains for the subsequent results summary, where the latter train type assumes a gross weight of 1 010 tons and a cargo weight of 313 tons.

Table S 1: Marginal damage costs for an average passenger and freight train (NOK2025 per vehicle kilometer), daytime (07:00-19:00).

Train	Energy	Area	CO ₂	Local air pollution	Noise	Accident	Maintenance	Renewal	TOTAL
Passenger	Electric	Rural	0,00	0,00	0,00	2,23	24,01	30,95	57,19
Passenger	Electric	Small urban	0,00	0,00	0,00	2,23	24,01	30,95	57,19
Passenger	Electric	Large urban area	0,00	0,00	0,00	2,23	24,01	30,95	57,19
Freight	Electric	Rural	0,00	0,00	0,50	1,21	24,01	30,95	56,67
Freight	Electric	Small urban	0,00	0,00	1,30	1,21	24,01	30,95	57,47
Freight	Electric	Large urban area	0,00	0,00	1,80	1,21	24,01	30,95	57,97
Passenger	Diesel	Rural	6,42	1,06	0,00	2,23	24,01	30,95	64,67
Passenger	Diesel	Small urban	6,42	7,40	0,00	2,23	24,01	30,95	71,00
Passenger	Diesel	Large urban area	6,42	45,36	0,00	2,23	24,01	30,95	108,97
Freight	Diesel	Rural	19,15	3,17	0,50	1,21	24,01	30,95	78,99
Freight	Diesel	Small urban	19,15	22,08	1,30	1,21	24,01	30,95	98,70
Freight	Diesel	Large urban area	19,15	135,38	1,80	1,21	24,01	30,95	212,50

Rural areas encompass up to 15 000 inhabitants, small urban areas hold 15 000 – 100 000 inhabitants, while large urban areas span more than 100 000 inhabitants.

Table S 2: Marginal damage costs for an average passenger and freight train (NOK2025 per vehicle kilometer), evening (19:00-23:00).

Train	Energy	Area	CO ₂	Local air pollution	Noise	Accident	Maintenance	Renewal	TOTAL
Passenger	Electric	Rural	0,00	0,00	0,00	2,23	24,01	30,95	57,19
Passenger	Electric	Small urban	0,00	0,00	0,10	2,23	24,01	30,95	57,29
Passenger	Electric	Large urban area	0,00	0,00	0,10	2,23	24,01	30,95	57,29
Freight	Electric	Rural	0,00	0,00	1,40	1,21	24,01	30,95	57,57
Freight	Electric	Small urban	0,00	0,00	4,20	1,21	24,01	30,95	60,37
Freight	Electric	Large urban area	0,00	0,00	8,00	1,21	24,01	30,95	64,17
Passenger	Diesel	Rural	6,42	1,06	0,00	2,23	24,01	30,95	64,67
Passenger	Diesel	Small urban	6,42	7,40	0,10	2,23	24,01	30,95	71,10
Passenger	Diesel	Large urban area	6,42	45,36	0,10	2,23	24,01	30,95	109,07
Freight	Diesel	Rural	19,15	3,17	1,40	1,21	24,01	30,95	79,89
Freight	Diesel	Small urban	19,15	22,08	4,20	1,21	24,01	30,95	101,60
Freight	Diesel	Large urban area	19,15	135,38	8,00	1,21	24,01	30,95	218,70

Rural areas encompass up to 15 000 inhabitants, small urban areas hold 15 000 – 100 000 inhabitants, while large urban areas span more than 100 000 inhabitants.

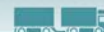
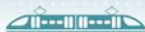


Table S 3: Marginal damage costs for an average passenger and freight train (NOK2025 per vehicle kilometer), night (23:00-07:00).

Train	Energy	Area	CO ₂	Local air pollution	Noise	Accident	Maintenance	Renewal	TOTAL
Passenger	Electric	Rural	0,00	0,00	1,60	2,23	24,01	30,95	58,79
Passenger	Electric	Small urban	0,00	0,00	1,00	2,23	24,01	30,95	58,19
Passenger	Electric	Large urban area	0,00	0,00	2,70	2,23	24,01	30,95	59,89
Freight	Electric	Rural	0,00	0,00	21,20	1,21	24,01	30,95	77,37
Freight	Electric	Small urban	0,00	0,00	68,80	1,21	24,01	30,95	124,97
Freight	Electric	Large urban area	0,00	0,00	119,80	1,21	24,01	30,95	175,97
Passenger	Diesel	Rural	6,42	1,06	1,60	2,23	24,01	30,95	66,27
Passenger	Diesel	Small urban	6,42	7,40	1,00	2,23	24,01	30,95	72,00
Passenger	Diesel	Large urban area	6,42	45,36	2,70	2,23	24,01	30,95	111,67
Freight	Diesel	Rural	19,15	3,17	21,20	1,21	24,01	30,95	99,69
Freight	Diesel	Small urban	19,15	22,08	68,80	1,21	24,01	30,95	166,20
Freight	Diesel	Large urban area	19,15	135,38	119,80	1,21	24,01	30,95	330,50

Rural areas encompass up to 15 000 inhabitants, small urban areas hold 15 000 – 100 000 inhabitants, while large urban areas span more than 100 000 inhabitants.

1 Innledning

1.1 Bakgrunn og formål

Transport er fundamentalt for at et samfunn skal fungere, og er dermed en nødvendig innsatsfaktor for samfunnets samlede velferd. Nytteverdien av transportmarkedet er derfor svært stor, og det er vanskelig å se for seg BNP-nivåer vi har i dagens samfunn uten transport. Transportmarkedet er imidlertid beheftet med markedssvikt, som innebærer at brukerne av transport påfører kostnader på andre aktører i samfunnet (vi omtaler dette som *skadekostnader*) uten at brukerne tar disse kostnadene innover seg når de tar sine beslutninger. Selv om transportmarkedet genererer svært store nyttevirkinger for Norge, innebærer disse eksterne kostnadene at sektoren ikke er rigget for å utnytte hele sitt potensiale for å maksimere samfunnets velferd. For å maksimere samfunnets velferd må også disse skadekostnadene tas med inn i beregningene, slik at man kan finne optimal innretning på infrastruktur, vedlikehold og andre transportrelaterte tjenester. Da er det nødvendig å kvantifisere skadekostnadene, gjerne på en per-kjøretøykilometer-basis (dvs. *marginale* skadekostnader).

Jernbanedirektoratet benytter marginale skadekostnader fra TØI-rapport 1704 (Rødseth et al., 2020), til sine konsekvensutredninger. Oppdragsgivers egne studier har avdekket at rapportens estimater av dieselforbruk og marginale slitasjekostnader begynner å bli utdaterte bl.a. som følge av teknologiutviklingen og endringer i logistikeffektivitet. Oppdragsgiver ser derfor et behov for å oppdatere underlaget for marginale eksterne kostnader for både person- og godstransport på jernbane. Oppdragsgiver har derfor bedt om vurderinger av utviklingstrekk som kan påvirke skadekostnader knyttet til transport på jernbane og tilhørende oppdaterte estimater på marginale skadekostnader og relevante utslippsfaktorer knyttet til:

- Støy
- Lokale utslipp
- Globale utslipp
- Ulykker
- Infrastrukturelitasje

Denne rapporten dokumenterer vårt arbeid med å oppdatere estimatene på de marginale skadekostnadene. For hver av disse typene skadekostnader har det vært oppdateringer av datagrunnlaget, og noe oppdatering av metodikk. I tillegg er det foretatt realprisjusteringer.

På samme måte som TØI-rapport 1704 er denne rapporten først og fremst en dokumentasjonsrapport og et oppslagsverk for en stor mengde skadekostnadsestimater som kan brukes i samfunnsøkonomiske analyser i Norge. Den representerer dermed et lite, men viktig skritt i forbedringen av kunnskapsgrunnlaget som støtter opp om analysearbeidet i den norske transportsektoren.

1.2 Avgrensning

Denne rapporten tar for seg arbeidet med å oppdatere estimatene på marginale skadekostnader for jernbanetransport. Dette betyr at rapporten ikke tar for seg tilsvarende oppdateringer for veitransport, sjøtransport eller luftfart. Rapporten jobber først og fremst med å oppdatere estimater for marginale skadekostnader og gjør ingen forsøk på å estimere det samlede skadekostnadsomfanget for Norge. Den ser heller ikke på hvorvidt eller i hvilken grad dagens avgifter, brukerbetalinger og subsidier kan bidra til at transportbrukerne internaliserer skadekostnadene ved jernbanetransport.

1.3 Rapportstruktur

Som i TØI-rapport 1704 er denne rapporten bygd opp tematisk ut fra de gjennomgåtte typene av skadekostnader, hvor vi gjennomgår data, metoder og endelige estimater i hvert temakapittel.

I kapittel 2 vil vi kort repetere den underliggende teorien om eksterne kostnader og hvordan de bør behandles i samfunnsøkonomiske analyser. I kapittel 3 vil vi ta for oss oppdateringene av marginale skadekostnadsestimater knyttet til utslipp til luft. I kapittel 4 gjennomgår vi estimeringen av marginale skadekostnader knyttet til ulykker. I kapittel 5 tar vi for oss estimeringen av marginale skadekostnader knyttet til støy. I kapittel 6 og 7 gjennomgår vi marginale skadekostnader knyttet til infrastrukturslitasje knyttet til henholdsvis vedlikehold og fornying. I kapittel 8 gis en sammenfatning av oppdaterte skadekostnadsestimater, hvor de ulike skadekostnadskomponentene plasseres sammen i oppsummeringstabeller. I kapittel 9 diskuterer vi de samlede resultatene og konkluderer.

1.4 Ordforklaring

NKA – nyttekostnadsanalyse

SØA – samfunnsøkonomisk analyse

MBV – marginale betalingsvillighet

Trafikkarbeid – betegnelse på størrelsen av trafikkomfanget og måles i kjøretøykilometer

Transportarbeid – betegnelse på hvor mye person- eller godstransport som utføres og måles i tonnkilometer (antall tonn gods transportert * antall kilometer transportering av godsmengden) eller passasjerkilometer (antall passasjerer transportert * antall kilometer transportering av passasjermengden)

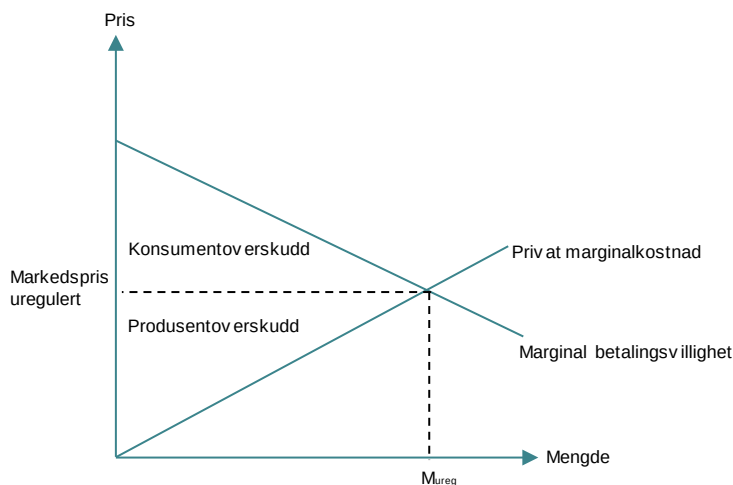
Ekstern kostnad – når noens forbruk eller produksjon påfører ulemper, dvs. skadekostnader, på andre aktører i markedet, uten at vedkommende trenger å ta disse skadekostnadene innover seg

2 Eksterne kostnader – teori

Dette kapitlet baserer seg i stor grad på kapittel 2 i TØI-rapport 1953, med noen mindre justeringer.

2.1 Eksterne kostnader som markedssvikt

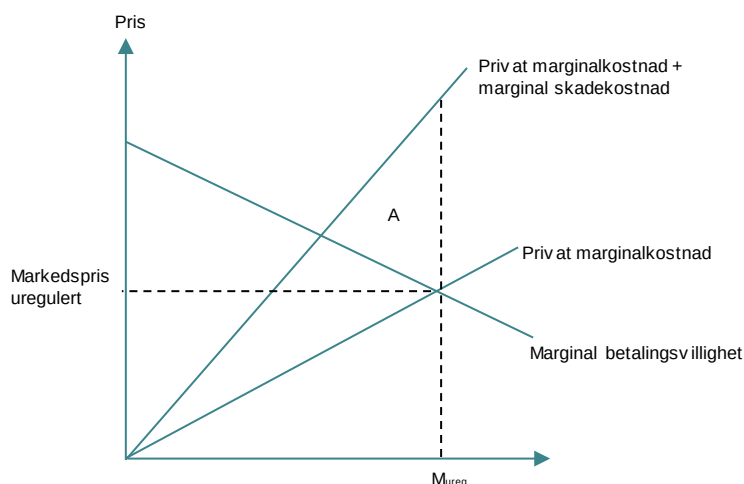
I samfunnsøkonomifaget er sentralt punkt at i et marked hvor det ikke forekommer noe markedssvikt i noen form, så er det samfunnsøkonomiske overskuddet maksimert når prisen er satt slik at forbrukernes marginale betalingsvillighet (MBV) er lik bedriftenes marginalkostnad (MK). Enkelt sagt, der tilbud er lik etterspørsel. Uten markedssvikt, så sammenfaller dette med at samfunnets MBV er lik samfunnets MK. En slik likevekt vises i figuren under.



Figur 2.1: Samfunnsøkonomisk effektiv likevekt i uregulert marked uten markedssvikt.

Denne likevekten er samfunnsøkonomisk effektiv (også kalt Pareto-optimal) siden samfunnets overskudd (summen av forbrukernes konsumentoverskudd og bedriftenes produsentoverskudd) er maksimert. Da er det ikke mulig å øke velferden til noen i markedet uten at noen andres velferd må reduseres.

Hva som er en mest mulig samfunnsøkonomisk effektiv likevekt, endrer seg dersom det er til stede en eller flere markedssvikt. **En slik markedssvikt kan være eksterne kostnader.** Dersom produksjonen av et gode (f.eks. transporttjenester) påfører andre i samfunnet en skade som produsenten (eller transportbruker) ikke blir belastet for, vil ikke lenger den private MK representere samfunnets MK. Samfunnets MK er da summen av privat MK og marginal skadekostnad. Dersom markedet blir overlatt til seg selv med en likevekt hvor privat MK er lik MBV, oppstår et dødvektstap – en ineffektivitet i økonomien. Dette skjer fordi produksjonen genererer større samfunnskostnader enn det samfunnet er villig til å betale for. Markedsprisen er rett og slett for lav, og produksjonen er for høy. Størrelsen på dødvektstapet sier noe om hvor ineffektiv likevekten er. Dødvektstapet vises i figuren med trekant A.

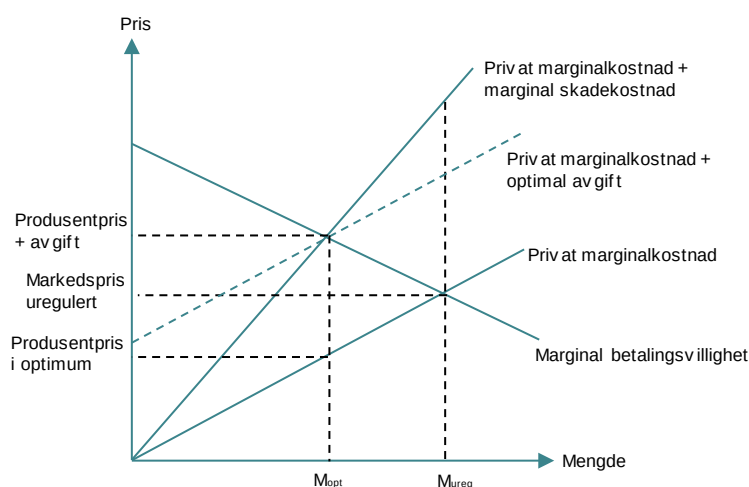


Figur 2.2: Markedslikevekt med et dødvektstap pga. eksterne kostnader som ikke er internalisert.

Dette dødvektstapet kan f.eks. representere kostnadene av støy fra et tog som kjører gjennom en by på natta. Den marginale verdien av en ekstra togavgang i dette eksempelet er lavere enn samfunnets marginalkostnad. De minst verdifulle togavgangene (lengst til høyre i diagrammet) har en verdi (MBV) som overstiges av samfunnskostnaden de genererer.

2.2 Bruk av avgifter til å forbedre samfunnsøkonomisk effektivitet

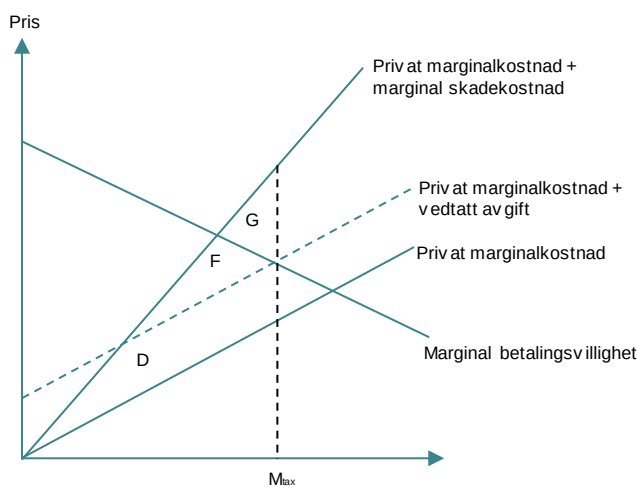
Når den økonomiske aktiviteten genererer skadekostnader kan myndighetene sørge for at prisen forbrukerne betaler gjenspeiler der hvor samfunnets MBV er lik samfunnets MK. Da sørger de for et mer samfunnsmessig effektivt resultat i markedet. En måte å sørge for at det skjer er å legge på en avgift som er lik marginal skadekostnad, som sikrer den mest effektive likevekten tilgjengelig. Dette kalles gjerne Pigou-avgifter, oppkalt etter Arthur Pigou (Pigou, 1920) som var blant de første til å systematisk analysere forurensing som en ekstern kostnad.



Figur 2.3: Markedslikevekt hvor dødvektstapet fra eksterne kostnader er blitt fjernet som følge av bruk av samfunnsøkonomisk effektiv avgift (avgift = marginal skadekostnad).

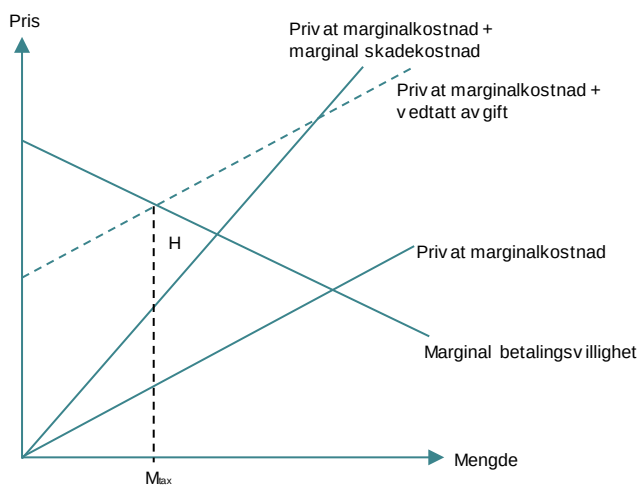
En **avgift satt lik marginal skadekostnad er det mest effektive incentivet myndighetene kan gi** under slike omstendigheter. Både avgifter høyere enn marginal skadekostnad og avgifter lavere enn marginal-kostnad vil føre til mindre effektive likevekter. Dersom avgiftene er for lave, gir de for svake incentiver til å økonomisere med den forurensende aktiviteten sammenlignet med det som er optimalt, noe som er ineffektivt. Er avgiftene for høye vil det fortrenge aktiviteter som det er betalingsvillighet for, selv med skadekostnad inkludert, som også er ineffektivt.

Dersom man har satt en avgift på den skadelige aktiviteten som er lavere enn optimalt, vil deler av skadekostnaden være internalisert, mens deler av skadekostnaden fortsatt vil være ekstern. Dette er vist i figur 4. Den totale skadekostnaden er satt sammen av arealet D+F+G. Den internaliserte delen av skadekostnaden er arealet D. Den eksterne delen av skadekostnaden er arealet F+G. Effektivitetstapet utgjør arealet G, som et resultat av at det aktivitetsnivået har en større samfunnskostnad enn det er betalingsvillighet for.



Figur 2.4: Markedslikevekt med ineffektiv avgift som fører til underinternalisering og et dødvektstap.

Figuren under viser effektivitetstapet av at man har en avgift høyere enn marginal skadekostnad. Her er aktivitetsnivået lavere enn det det er betalingsvillighet for, selv om man tar med skadekostnadene. Samfunnsøkonomisk lønnsom aktivitet blir blokkert, som gir effektivitetstapet representert av arealet H.



Figur 2.5: Markedslikevekt med ineffektivt høy avgift som fører til overinternalisering og et dødvektstap.

2.3 Hva betyr dette for nyttekostnadsanalyser

Det kan være litt komplisert å holde fullstendig oversikt over nytte-, kostnads- og fordelingsvirkninger når man skal håndtere eksterne kostnader fra transportaktivitet i en nyttekostnadsanalyse (NKA). I slike tilfeller er bruttometoden, som brukes i Statens vegvesens NKAer, spesielt godt egnet (Minken & Samstad, 2005). Dette kan illustreres med et eksempel:

Sett at et tiltak fører til reduserte generaliserte reisekostnader for bilister. Dette medfører høyere brukernytte, ikke bare fordi reisene man hadde i utgangspunktet blir billigere, men også fordi man velger å foreta flere reiser - induisert biltrafikk. Men den induerte trafikken medfører også høyere skadekostnader. Drivstoffavgifter (og eventuelt et framtidig system for veipricing) vil dempe noe av både trafikkveksten og skadekostnadsveksten som ellers ville kommet. Økningen i drivstoffavgifter er en kostnad for trafikantene, men en inntekt for myndighetene. Det bokføres begge steder, men er i prinsippet en overføring mellom trafikanter og myndigheter. Derimot mottar gruppen «samfunnet for øvrig» nytteeffekter ved at det innbetalte avgiftsbeløpet antas å avlette behovet for vridende skatter ellers². Det beregnes forenklet med skattevridningsfaktoren (20%) multiplisert med endringen i innbetalt avgiftsbeløp som følge av trafikkøkningen.

Tabell 2.1: Stilisert oppsett for trafikantnytte, skadekostnader og avgifter i nyttekostnadsanalyser.

Konsekvenstema	Nytte-/Kostnadsvirkning
Trafikanter	+ Brutto trafikantnytte
	- Trafikantkostnader før avgifter
	- Avgifter
Myndigheter	+ Avgifter
Samfunnet for øvrig	+ Redusert skattevridningskostnad
	- Skadekostnader
Oppsummert	+Netto trafikantnytte
	+Redusert skattevridningskostnad
	- Skadekostnader

I dette eksemplet er det kun tre netto nytte- og kostnadsvirkninger, nemlig økt trafikantnytte, økte skadekostnader og reduserte skattevridningskostnader. Endringen i innbetalte avgifter er i nettoberegningen kun en omfordeling mellom trafikanter og myndigheter.

Det er viktig at NKAen har kontroll på avgiftene (og i jernbanesammenheng – kjøp av transporttjenester) i transportsektoren av hensyn til skattevridningskostnader, fordelingseffekter og, kanskje viktigst, at de utgjør en vesentlig del av transportbrukerens kostnadsbilde og er dermed viktig for å modellere hvordan transportlikevekten etter tiltaket ser ut. Å ha rimelige forutsetninger for f.eks. størrelsen på drivstoffavgiftene er viktig for å kunne gjøre rimelige prediksjoner om trafikkmengder og sammensetning av bilpark. Det er rett og slett viktig input til deskriptive modellberegninger. Deretter spiller avgifter inn på det normative, nemlig vurderinger av nytte og kostnader i NKAen, hvor skattevridningskostnader tas med. Eventuelle fordelingseffekter kan redegjøres for i en tilleggsdiskusjon, som ofte er anbefalt i veiledere i samfunnsøkonomisk analyse (Direktoratet for økonomistyring, 2023).

² Hvis det f.eks. var bestemt at avgiften var del av en tiltakspakke hvor provenyet fra inntektene eksplisitt øremerket til f.eks. støtte til nullutslippsteknologi, burde det være en del av den samlede samfunnsøkonomiske kalkylen. I denne rapporten tar vi utgangspunkt i standardantagelsene i norske samfunnsøkonomiske veiledere.

3 Utslipp til luft

Dette kapitlet er strukturert som følger. I kapittel 3.1 gjennomgår vi først enhetspriser på globale utslipp (klimagassutslipp) og lokale utslipp (NO_x , PM_{10} og SO_2) som kan brukes som kalkulasjonspriser i samfunnsøkonomiske analyser.

- **Globale utslipp:** Ett tonn CO_2 -ekvivalent (tCO_2e) bidrar til samme klimagasskonsentrasjon uavhengig av utslippssted. Økte konsentrasjoner i atmosfæren forventes å gi alvorlige klimændringer og påføre globale skadekostnader. Det er derfor naturlig å bruke den globale skadekostnaden - eller den globale tiltakskostnaden (skyggeprisen) for å oppfylle bindende mål som Parisavtalen - som kalkulasjonspris i samfunnsøkonomiske analyser. Hver tCO_2e -endring i et gitt år kan verdsettes likt, uavhengig av om reduksjonen skyldes færre kilometer kjørt eller lavere utslipp per kilometer.
- **Lokal luftforurensing:** Lokale utslipp til luft gir derimot skadelige konsentrasjoner i avgrensede områder, som byer, der skadeomfanget avhenger av konsentrasjonsnivå og hvor mange mennesker som eksponeres. Dette påvirker igjen den marginale skadekostnaden.

Utslipp per togkilometer: I kapittel 3.2 gjennomgår vi beregninger av gjennomsnittlig dieselforbruk per togkilometer for ulike typer dieseltog. Videre beregnes utslipp og skadekostnader per togkilometer.

Case-beregninger med oppdatert metodikk: I kapittel 3.3 gjennomgår vi beregninger av utslippskostnader for $\text{PM}_{2.5}$ og NO_2 for case-byene Trondheim og Bodø med oppdatert metodikk som brukes i Folkehelseinstituttets Verdsettingsprosjekt.

3.1 Verdsetting per utslippsenhet

3.1.1 Enhetspriser på globale utslipp

I nyeste versjon av Finansdepartementets Rundskriv 109 (Finansdepartementet, 2021b) finnes veiledning på hvordan klimagassutslippene skal prissettes i samfunnsøkonomisk analyser. Prinsippene som ligger til grunn er beskrevet på følgende vis i Finansdepartementet (2021a):

Regelverket som regjeringen fastsatte 25. juni 2021 er i samsvar med:

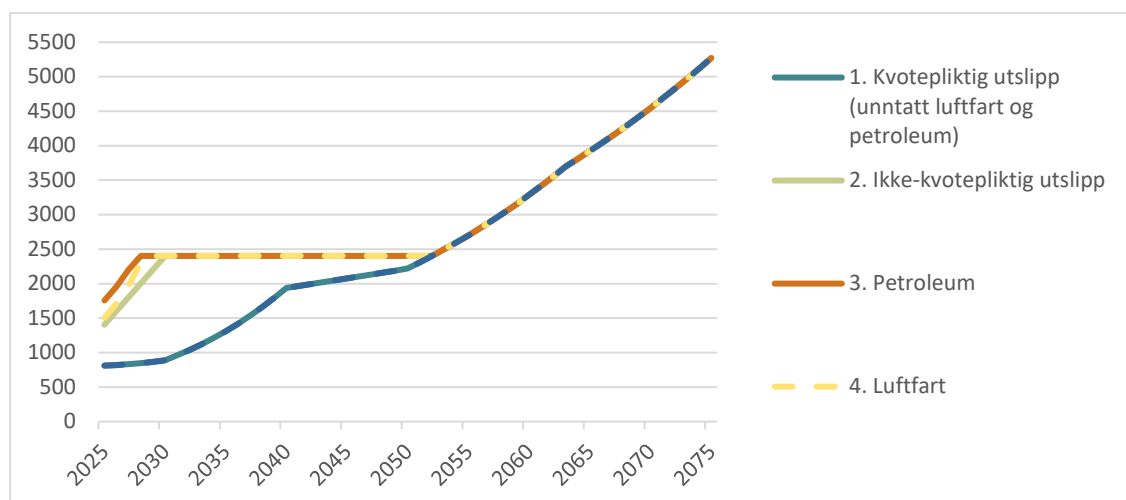
1. *Norges mål om å redusere klimagassutslippene med minst 50 prosent og opp mot 55 prosent sammenliknet med nivået i 1990.*
2. *Parisavtalens ambisjon om «å holde den globale temperaturstigningen godt under 2 grader, og tilstrebe å begrense temperaturstigningen til 1,5 grader».*
3. *At hovedvirkemidlene i norsk klimapolitikk er klimagassavgifter og omsettbare utslippskvoter som gjelder på tvers av sektorer.*

Finansdepartementet fastsetter årlig karbonprisbaner i tråd med gjeldende regelverk. Ved fastsettelsen veises behovet for oppdaterte anslag på CO_2 -avgifter, kvotepris og langsiktig utvikling opp mot forutsigbarhet og sammenlignbarhet med tidligere analyser. Grunnlaget for de langsiktige karbonprisbanene skal jevnlig vurderes på nytt med noen års mellomrom i lys av både norsk og internasjonal utvikling.

Regelverket angir egne karbonprisbaner for ulike sektorer;

1. Kvotepliktig utslipp (unntatt luftfart og petroleum)
2. Ikke-kvotepliktig utslipp
3. Petroleumssektoren
4. Luftfart
5. Utslipp og opptak fra skog- og arealbruk

De respektive karbonprisbanene er vist i figur 3.1.



Figur 3.1: Karbonprisbaner iht. Rundskriv 109 per 2022 (i 2025-kr) for utslipp fra fem ulike sektorer for perioden 2025-2075. Samtlige sektorer følger samme prisbane etter 2052.

For dieselbasert togtransport vil det per 2025 være prisbanen for ikke-kvotepiktig utslipp som er gjeldende. I denne prisbanen verdsettes ett tonn CO₂-ekvivalent (tCO₂e) til 1405 kr₂₀₂₅, i tråd med gjeldende CO₂ avgift i 2025. Prisen vokser til 2400 kr₂₀₂₅ i 2030. Derfra holder prisbanen seg flat fram til 2052, hvor den innhentes av prisbanene til sektor 1) og 5). Disse prisbanene følger

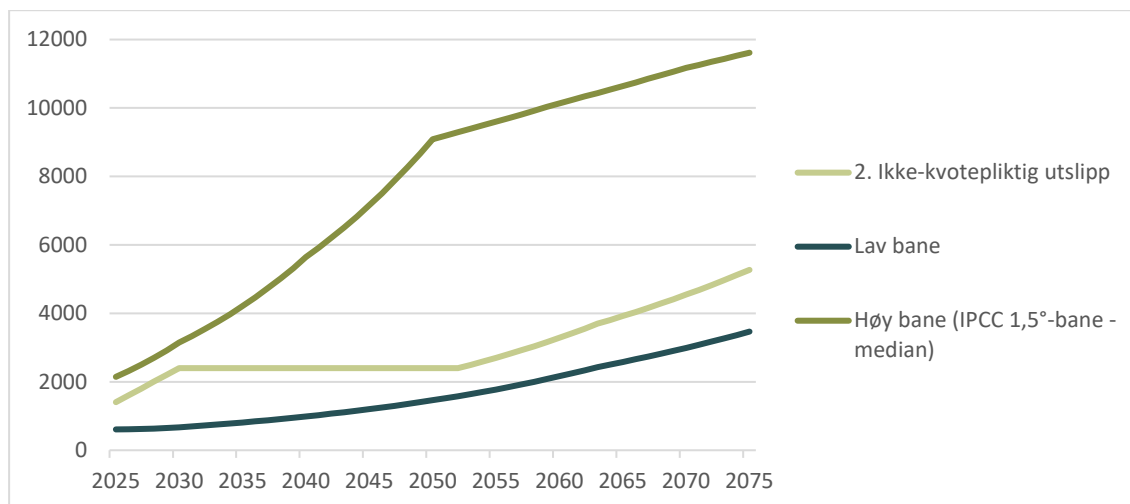
- Forventet prisutvikling på EU ETS-kvoter (dvs. i EU sitt marked for handling med utslippskvoter) fram til 2030
- Prisbanen i IEAs Announced Pledges Scenario (IEA, 2024) mellom 2030 og 2050
- Kalkulasjonsrenta for samfunnsøkonomiske analyser fra 2050.

Fra 2052 og utover følger karbonprisbanen for alle sektorer, inkludert for ikke-kvotepiktig sektor, samme takt som kalkulasjonsrenten (hvor nedtrapping i rentesats etter hhv. 40 og 75 år er inkludert, selv om dette kan gi noe tidsinkonsistens).

Der hvor det er sentralt for analysens resultat kan det gjøres følsomhetsanalyser med en høyere og en lavere karbonprisbane. Den høye prisbanen tar utgangspunkt i median-anslaget av modellberegninger som anslår trengs for å begrense oppvarming til 1,5 grader, som er gjengitt FNs klimapanel (IPCC, 2018)³. Den lave prisbanen er satt til 75 prosent av kvoteprisen i det første året og vokser deretter med kalkulasjonsrenten for samfunnsøkonomiske analyser.

Figur 3.2 gjengir prisbanene for ikke-kvotepiktig sektor, sammen med høy og lav prisbane. Merk at kurven merket «2. Ikke-kvotepiktige utslipp» er den samme som i figur 3.1.

³ Denne prisbanen er tett opp til det som ble gitt som hovedanbefaling i TØI-rapport 1704.



Figur 3.2: Karbonprisbaner iht. Rundskriv 109 per 2025 (i 2025-kr) for utslipp fra ikke-kvotepliktig sektor for perioden 2025-2075, samt høy og lav karbonprisbane for følsomhetsanalyser.

I TØI-rapport 1953/2023 (Wangsness et al., 2023) ble det bemerket at det er visse faglige svakheter med å bruke IEAs karbonprisbane, som er tyngdepunktet for karbonprisbanen mellom 2030 og 2040, til kalkulasjonspris for klimagassutslipp i samfunnsøkonomiske analyser. Som poengtert i Hagen-utvalget (NOU 2012:16, 2012) burde kalkulasjonsprisen reflektere den marginale tiltakskostnaden for klimamålet som er satt. Det er ikke rollen karbonprisene spiller i IAE sine scenarioer. IAE skriver selv:

All scenarios consider the effects of other policy measures alongside CO₂ pricing, such as coal phase-out plans, efficiency standards and renewable targets. These policies interact with carbon pricing; therefore CO₂ pricing is not the marginal cost of abatement as is often the case in other modelling approaches (IEA, 2024, s. 20).

IEA behandler karbonprisen som et politisk virkemiddel som kommer i tillegg til annen klima- og energi-politikk. Dette skiller seg fra skyggeprisen⁴ per utslippsenhet for å nå et utslippsmål. Man kunne tenke seg i noen sektorer at man ved direkte regulering (f.eks. forbud) fjerner alle utslipp uten å bruke en karbonpris. Dette ville vært i henhold til IEA sitt scenariodesign. Skyggeprisen for slike virkemidler er likevel ikke null. Derfor kan karbonpriser fra IEA sine scenarioer være lite egnede som kalkulasjonspriser i samfunnsøkonomiske analyser. Det forklarer også hvorfor IEAs priser ligger godt under selv 25. persentilen av skyggeprisene for å nå 1,5-gradersmålet, som TØI-rapport 1704 anbefalte som nedre følsomhetsgrense.

En mer detaljert gjennomgang av modellberegnete karbonprisbaner til bruk i samfunnsøkonomiske analyser, samt behandlingen av kvotepliktige og ikke-kvotepliktige utslipp, finnes i TØI-rapport 2037/2024 (Rosendahl & Wangsness, 2024). Dette kan med fordel inngå i Finansdepartementets neste revisjon av de langsiktige karbonprisbanene. I mellomtiden følges karbonprisbanene som Finansdepartementet legger til grunn i henhold til Rundskriv 109.

⁴ Skyggeprisen er ikke en eksplisitt markedspris, men en pris/kostnad avledet fra et bindende mål eller bindende restriksjon. Her vil det tilsvare tiltakskostnaden for å kutte det siste tonnet med utslipp slik at man akkurat overholder utslippsmålet til lavest mulig kostnad.

3.1.2 Enhetspriser på lokal luftforurensing

Lokal luftforurensning fra transport skyldes utslipp av miljø- og helseskadelige stoffer fra kjøretøy, typisk fra forbrenning av fossile drivstoff. For vegtrafikk kommer tilleggseffekter fra slitasje på veidekket – særlig ved bruk av piggedekk – samt fra dekk og bremses.

Skadekostnadsestimatene i TØI-rapport 1704/2019 bygger på de beregningene som danner grunnlaget for dagens enhetspriser i nyttekostnadsanalyser (NKA). Disse ble utviklet i LEVE-prosjektet og dokumentert i Rosendahl (2000). Med utgangspunkt i disse beregningene er det blitt gjort justeringer i enhetsprisene i SFT (2005), Magnussen et al. (2010) og Thune-Larsen et al. (2014).

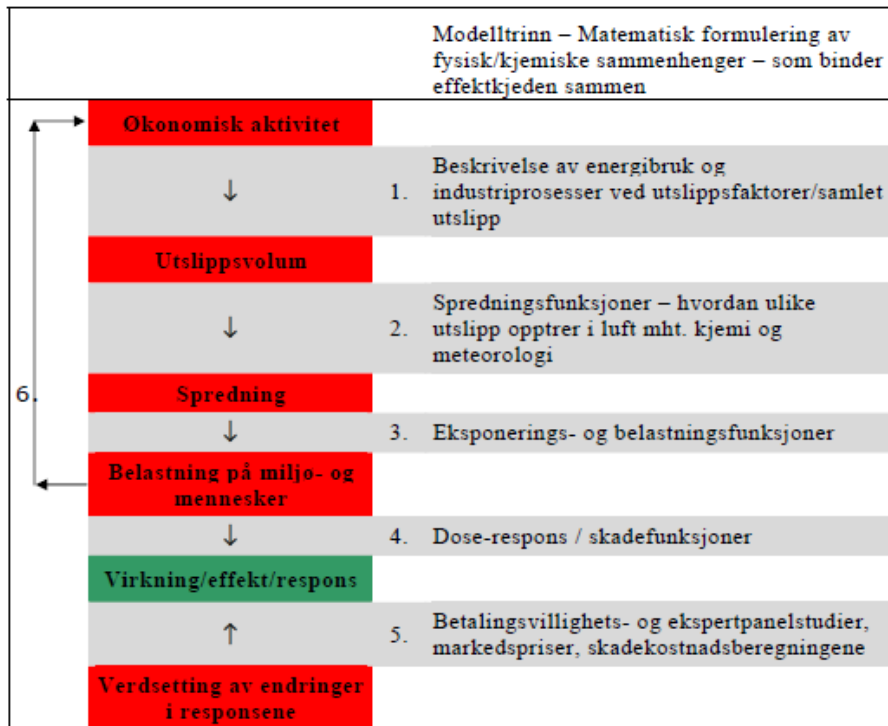
Parallelt med dette utredningsprosjektet på eksterne kostnader pågår det et omfattende forskningsprosjekt (Verdsettingsprosjektet), ledet av Folkehelseinstituttet (FHI). Dette prosjektet har som mål å oppdatere kunnskapen om helseeffektene av luftforurensning og støy til bruk i verdsetting. Prosjektet forventes ferdigstilt i løpet av 2026. Dette representerer en mulighet for en fundamental forbedring av kunnskapsgrunnlaget bak verdsetting av marginale skadekostnader fra utslipp til luft. Forbedringene i både datagrunnlag og metodikk vil bidra til å øke presisjonen og robustheten til disse verdsettingsestimatene.

Forskere ved FHI som jobber med Verdsettingsprosjektet deltar i denne utredningen av marginale skadekostnader. Ettersom dette prosjektet fortsatt har litt over et år igjen, er det ikke anledning til å lage en komplett verdsetting av alle typer utslipp til luft som vi ønsker, og ikke til å lage kalkulasjonspriser for de tre tettstedskategoriene vi anvender. Det er imidlertid anledning til å gjøre analyser av marginale skadekostnader for PM_{2.5} og NO₂ i de tettstedene som uansett er mest aktuelle i analysen av utslipp fra dieseldrevne tog⁵, nemlig Trondheim og Bodø. Disse kan i så måte fungere som case-studier for de anvendte tettstedskategoriene. Selv om dette ikke kan passe helt inn i det foreliggende rammerverket vi bruker for marginale skadekostnader, vil de gi viktige pekepinner på hvordan verdsetting basert på oppdaterte data og metoder kan sammenlignes med estimatene som er blitt brukt de siste 20 årene. Når Verdsettingsprosjektet er fullført, burde det gjennomføres oppdateringer for estimater for marginale eksterne kostnader av lokale utslipp for alle virksomhetene i transportsektoren. I denne rapporten får vi en gjennomgang av metodikken som brukes i Verdsettingsprosjektet for de relevante case-byene Trondheim og Bodø. Dette gis i kapittel 2.3.

Verdsetting av lokal luftforurensing med foreliggende metode og data

SFT (2005) gir en overordnet beskrivelse av metodikken fra LEVE-prosjektet. Tilnærmingen følger en logisk årsaks-virkningskjede fra økonomisk aktivitet til verdsatte helse- og miljøeffekter. Metoden, også kjent som skadefunksjonsmetoden, brukes fordi den gir en klar sammenheng mellom endringer i forurensningsbelastning og effekter på helse og miljø. Dette sikrer at de relevante endringene verdsettes og gjør resultatene lettere å formidle og bruke videre. En skisse av effektkjeden er gitt i figur 3.3.

⁵ Det aller meste av lokal luftforurensing fra togtransport skyldes dieseltogs forbrenning av diesel. Det genereres imidlertid svevestøv på grunn av togs slitasje på jernbaneskinnene bidrar til lokal luftforurensing. Dette betyr at også elektriske tog kan generere lokal luftforurensing. Da skadekostnadene fra dette vurderes som små, vil vi i denne rapporten kun fokusere på lokale utslipp fra dieseltog. For eksempel undersøker Låg et al. (2017) mulig helserisikoen forbundet med høye svevestøvnivåer ved Nationaltheateret stasjon i Oslo. Forfatter konkluderer med at passasjerer trolig ikke utsettes for helseskadelige effekter, men anbefaler likevel at det ut fra et føre var-prinsipp settes inn tiltak for å redusere svevestøvnivåene.



Figur 3.3: Skisse av effektkjedetilnærmingen. Kilde: SFT (2005).

I TØI-rapport 1704/2019 ble trinn 3-5 i beregningene fra LEVE-prosjektet oppdatert. I denne rapporten er det kun anledning til å gjøre enkle oppdateringer i trinn 3 og 5. I trinn 3 justeres skadekostnads-estimatene med befolkningsvekst i de aktuelle områdetypene (tettsteder med over 100 000 innbyggere og tettsteder med 15 000-100 000 innbyggere), slik at økt potensiell eksponering per utslippsenhet fanges opp. I trinn 5 justeres estimatene for vekst i BNP per innbygger, i tråd med Rundskriv 109/21 (Finansdepartementet, 2021b)⁶, for å reflektere økt betalingsvillighet for å unngå helsebelastninger fra forurensing.

Trinn 4 er videreført uendret. TØI-rapport 1704 gir tabeller med forventede langtidseffekter og korttids-effekter dersom 1000 personer utsettes for en økning i årsmiddelkonsentrasjon på 1 µg/m³ PM₁₀ eller 1 µg/m³ NO₂. Eksempler på slike effekter er «økning i antall personer som etter en 5-årsperiode dør 8 år før forventet levealder som følge av hjerte-kar og annen lungesykdom» eller «økning i antall liggedøgn på sykehus for luftveislidelser». Selv om disse effektene kan påvirkes av endringer i befolkningssammensetning og helsetilstand, har det ikke vært anledning til å gjøre justeringer for perioden mellom 2019 og 2025.

For den tredje områdetypen, spredtbygde strøk, ansees helsebelastningen av lokal forurensing som såpass lav at marginal skadekostnad er satt til null. Dette fordi eksponeringen til luftforurensing fra dieseldrevne tog er ansett som såpass liten, og det har ikke blitt gjort inngående analyser. Norge har imidlertid forpliktet seg til Gøteborgprotokollen fra 1999, med oppdaterte forpliktelser fra 2012⁷, som gir utslippsforpliktelser for utslipp av SO₂, NO_x, NH₃, NM_{VOC} og PM_{2,5}. Det pågår videre revideringer av

⁶ «Kalkulasjonspriser som er avledet av VSL og som bygger på verdsetting av helse- og dødelighetsendringer, kombinert med kunnskap om dose-respons-sammenhenger mellom utslipp, konsentrasjonsnivåer og helsevirkninger, skal realprisjusteres i takt med veksten i BNP per innbygger i siste tilgjengelige perspektivmelding fra Finansdepartementet.»

⁷ <https://unece.org/environmental-policy/air/protocol-abate-acidification-eutrophication-and-ground-level-ozone>

protokollen i FN gjennom 2024 og 2025⁸. I tillegg har Norge forpliktet seg til den første versjonen av EUs NEC-direktiv (National Emission Ceiling), EUs utslippstakdirektiv, som er EUs måte å innføre Gøteborg-protokollen i alle sine medlemsland på. Den nyeste versjonen av utslippstakdirektivet fra 2024 er per november 2025 ikke tatt inn i norsk lovverk gjennom EØS-avtalen (Miljødirektoratet, 2025).

Norge oppfylte de gjeldende 2012-forpliktelsene for NO_x i Gøteborgprotokollen (med 2020-som målsetningsår) i 2017, men Miljødirektoratet (2025) indikerer at flere kommuner vil bryte med grenseverdiene for NO₂ gitt i nyeste versjon av NEC-direktivet. Ettersom foreliggende analyseopplegg for transportsektoren vanskelig kan skille ut NO₂ fra NO_x, vurderer vi det som hensiktsmessig å behandle utslippsforpliktelsene som bindende også for NO_x, som dermed tilsier en tiltakskostnad større enn null.

I Ibenholt et al. (2015) anbefales det å anvende en marginal tiltakskostnad for NO_x lik dagens avgiftsnivå for NO_x, da det grovt sett sammenfalt med tidligere analyser på tiltakskostnader med å overholde Gøteborgprotokollen (Miljødirektoratet et al., 2014). Et tilleggsargument er at det sørger for at tiltakskostnaden man bruker i NKA faktisk sammenfaller med marginal tiltakskostnad i store deler av det norske næringslivet (som tilpasser seg NO_x-avgiften). Denne ble videreført både i TØI-rapport 1704 og TØI-rapport 1953.

Vi har ikke funnet noen tidligere estimer av marginal tiltakskostnad for å redusere PM_{2,5} i Norge. Det er grunn til å anta at utslippsforpliktelsen i Gøteborgprotokollen og NEC-direktivet vil være bindende, selv med samfunnsøkonomisk effektive tiltak mot helseskadelige partikkelutslipp i byene. Rapporten *Reduserte utslipp av PM_{2,5}: Tiltak og virkemidler - vedfyring som kilde* (Buø et al., 2025) fra Miljødirektoratet finner at dagens tiltak og virkemidler ikke er tilstrekkelige for å overholde skjerpede grenseverdier fra EUs reviderte luftkvalitetsdirektiv, og nye lovpålagte døgnmiddelgrenseverdi for PM_{2,5} og eventuelle skjerpede utslippskrav etter pågående revidering av Gøteborgprotokollen. Rapporten vurderer også at dagens tiltak og virkemidler ikke er tilstrekkelige til å nå nasjonalt miljømål for PM_{2,5}, eller luftkvalitetskriteriene for trygg luft. Det tilsier at tiltakskostnaden som brukes i samfunnsøkonomiske analyser ikke bør settes til null. Inntil bedre beregninger på foreligger, kan et utgangspunkt være at på marginen bør det, av effektivitetshensyn, i det minste være samme marginale tiltakskostnad for å redusere en kg PM_{2,5} som en kg NO_x.

Vi har heller ikke funnet noen nye estimer for marginale skadekostnader eller tiltakskostnader knyttet til SO₂. I rapporten *Marginale eksterne kostnader ved enkelte miljøpåvirkninger* (Ibenholt et al., 2015), argumenteres det for at tiltakskostnadene for å oppfylle Gøteborgprotokollens krav til utslippsreduksjoner av SO₂ trolig er null og at helseskadene ved dagens utslippsnivå kan settes til null. Derimot viderefører de anslagene fra SFT (2005) av skadekostnadene knyttet til forsurening av miljø og skader på bygningsmaterialer, som varierer mye for ulike deler av landet. Flere av de samme forfatterne (Magnussen et al., 2015) aggregerer disse kostnadene til sjablongmessige skadekostnader til å passe til de tre områdetypene ruralt, lite tettsted og stort tettsted. Fordi verdiene ikke omfatter helseeffekter, er de kun justert etter konsumprisindeksen.

De aktuelle justeringene i denne oppdateringen er som følger:

- Mellom 2019 og 2025 har de aktuelle områdetypene
 - o Tettsteder over 100 000 innbyggere hatt en befolkningsvekst på 5,9%
 - o Tettsteder med mellom 15 000 og 100 000 innbyggere hatt en befolkningsvekst på 8,0%
- Mellom 2019 og 2025 (hvor det var store svingninger i økonomien pga. korona-pandemien) har det vært noe reell vekst i BNP per innbygger, men også relativt høy prisvekst⁹. Vekst i nominelt

⁸ <https://unece.org/environment/news/revison-gothenburg-protocol-under-unece-air-convention-advances-parties-pave-way>

⁹ Prisvekst og BNP-vekst i 2025 er basert på SSBs prognoser i Statistikkbanken kildetabell 12880 og 09842.

BNP per innbygger har vært på 36,9 % som brukes til å justere enhetsprisene fra 2019-verdier i 2019-kr til 2025-verdier i 2025-kr.

- NO_x-avgiften er blitt oppjustert nominelt over tid og er nå på 26,36 kr¹⁰ (2025-kr)
- Enhetsprisene for SO₂ justeres med konsumprisindeksen

Tabell 3.1 gir oss dermed estimerte marginale skadekostnader (og tiltakskostnader) for PM₁₀ for 2025.

Tabell 3.1: Anbefalte enhetspriser for utslipp av PM₁₀ (2025-kr).

	Spredt bebyggelse	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	Tettsted (>100 000 innb.)
NOK per kg PM ₁₀ - eksos	26,36	526	4 648
NOK per kg PM ₁₀ - veistøv	26,36	1 268	11 213
NOK per kg PM ₁₀ – vektet for eksos og veistøv	26,36	902	7 977
Type kostnad	Tiltakskostnad	Skadekostnad	Skadekostnad

Tabell 3.2 gir oss dermed estimerte marginale skadekostnader (og tiltakskostnader) for NO_x for 2025:

Tabell 3.2: Anbefalte enhetspriser for NO_x-utslipp (2025-kr).

	Spredt bebyggelse	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	Tettsted (>100 000 innb.)
NOK per kg utslipp	26,36	130	572
Type kostnad	Tiltakskostnad	Skadekostnad	Skadekostnad

Tabell 3.3 gir oss dermed estimerte marginale skadekostnader for SO₂ for 2025:

Tabell 3.3: Anbefalte enhetspriser (marginale skadekostnader) for utslipp av SO₂ (2025-kr).

	Spredt bebyggelse	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	Tettsted (>100 000 innb.)
NOK per kg SO ₂	0	14	28

Beløpene i tabellene ikke er avrundet fordi det skal gjøre det mer gjennomsliktig, konsistent og sporbart med senere arbeid. Eksakte beregningsresultater gjør at analytikere i senere arbeid kan vite at de har replikert gamle resultater. Det betyr *ikke* at tallene kan ansees som sikre.

Vi ønsker å gjøre oppmerksom på en rekke **forbehold**:

- Estimatenes for marginale skadekostnader er beheftet med stor usikkerhet, bl.a. fordi
 - Datagrunnlaget som underbygger estimatene, er gammelt
 - Det er spesielt et behov for å oppdatere spredningsfunksjonene for å få en oppdatert sammenheng mellom mengden utslipp, konsentrasjonsmengde og antall eksponerte.
 - Det er behov for å gjøre en oppsplitting på finere partikler PM_{2,5} og grovere partikler PM_{2,5-10}.
 - Det er behov for å revidere spredning og eksponering i lys av endret sammensetning av utslipp ettersom en større andel av bilparken ikke har eksosutslipp, og piggdekkandelen er blitt lavere i byene.

¹⁰ [Avgiftssatser 2022 - regjeringen.no](https://www.regjeringen.no)

- Områdetypene er svært grove, som gjør at treffsikkerheten i et gitt tettsted kan være lav. I tillegg fanger ikke estimatene opp viktige variasjoner innenfor tettsteder, f.eks. knyttet til befolkningstetthet og-sammensetning, spredningsfunksjoner og konsentrasjonsnivåer. Når formålet er standardiserte samfunnsøkonomiske analyser i transportsektoren som foretas på nasjonalt eller regionsnivå anser vi disse kalkulasjonsprisene som hensiktsmessige, selv om det er rom for forbedring. Det sikrer også konsistens og sammenlignbarhet med tidligere arbeid.
- Vi har kun verdsatt en håndfull utslipp. Det er andre utslipp fra transportsektoren (f.eks. ozon O_3) som er mindre i dokumentert skadeomfang, men marginal skade er ikke lik null. Alle forurensinger som ikke er tatt med i beregningene, kan vurderes som et påslag i en følsomhetsanalyse, eller tas med i vurderinger av ikke-prissatte virkninger.
- Vi har kun verdsatt en håndfull helseutfall. De diskuterte utslippene til luft kan forårsake flere typer helseutfall (f.eks. svekket kognitiv utvikling for barn), men vi har ikke funnet anvendelige resultater som kan brukes i de foreliggende effektkjedene. Skadekostnaden for disse ikke-inkluderte helseutfallene er sannsynligvis lavere enn de som er inkludert, men de er sannsynligvis større enn null. Videre kan vi påpeke at i de underliggende beregningene bruker vi VOLY (Value of Life-Year) istedenfor DALY (Disability-Adjusted Life-Year). Dette gjør at vi ikke har med oss verdien av den nedsatte helsekvaliteten av sykdom fram til forventet dødsfall, men det hindrer dobbelttelling av verdsettingen av øvrige sykdomseffekter. Disse aspektene er kilder til usikkerhet i kostnadsestimatene som isolert sett indikerer at skadekostnader fra utslipp til luft kan være undervurdert. Dette bør vurderes medtatt i følsomhetsanalyser av resultater i nytte-kostnadsanalyser.
- All usikkerheten peker mot at estimatene bør oppdateres fortløpende ettersom ny forskning og kunnskap bygges opp. Vi anbefaler at transportetatene har tabeller i regnearksformat samlet på et sted hvor analytikere til enhver tid kan se hvilke skadekostnadstall som skal anvendes (f.eks. på ntpmetode.no). Dette vil gjøre arbeidet med å oppdatere kostnadstallene mer fleksibelt og effektivt.

Vi anbefaler at kalkulasjonsprisene presentert i Tabell 3.1-Tabell 3.3 videreføres fram til Verdssettingsprosjektet på FHI er ferdigstilt. Foreløpige resultater fra prosjektet ser ut til å indikere at marginale skadekostnader fra lokal forurensing kan være vesentlig lavere i noen norske byer enn det verdsettingen gjengitt i dette delkapitlet tilsier. Noe av denne forskjellen drives av at eksponering for lokal luftforurensing og tilskrivbare helsetap er blitt vesentlig lavere over tid, og at FHIs metodikk baserer seg på en terskel i beregningene av tilskrivbare helsetap (f.eks. $4,15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for $\text{PM}_{2,5}$ og ikke $0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ som tidligere) og heller ikke inkluderer noen betalingsvillighet for å redusere utslippskonsentrasjoner fra personer som opplever utslippene som brysomme, men som selv ikke opplever helsetap. Generelle oppdateringer i datagrunnlag og beregningsmetodikk vil også bidra til forskjeller. Dette gjennomgås nærmere i kapittel 3.3.

Erfaringsmessig er det sjeldent at endringer i verdsatte lokale utslipp utgjør en såpass stor del av nytteberegningene i en samfunnsøkonomisk analyse at endret verdsetting ville medført vesentlig endring i resultatene (f.eks. ved å gå fra negativ til positiv netto nåverdi eller vice versa). **Dersom man i perioden til ferdigstilling av Verdssettingsprosjektet har en analyse hvor verdsettingen av lokale utslipp kan være utslagsgivende, anbefaler vi å gjennomføre en følsomhetsanalyse.** Gitt Verdssettingsprosjektets foreløpige beregningene for marginale skadekostnader av $\text{PM}_{2,5}$ og NO_2 for byene Trondheim og Bodø (gjennomgås i kapittel 2.3), anbefaler vi at følsomhetsanalysene kan teste ut implikasjonene av 75 % lavere verdsetting av PM_{10} og NO_x (eller marginal tiltakskostnad, om dette er høyere).

3.2 Utslipp til luft og skadekostnader per km fra dieseltog

Første skritt i denne delen av beregningen går ut på å anslå gjennomsnittlig dieselforbruk per togkilometer for ulike togtyper. Beregningen bygges videre med estimerte utslipp per liter diesel. Videre kan vi da beregne utslipp per kilometer kjørt med ulike typer dieseltog, og påfølgende marginale skadekostnader ved hjelp av kalkulasjonsprisene fra kapittel 3.1.

3.2.1 Dieselforbruk

Godstog

Et av de sentrale verktøyene for samfunnsøkonomisk analyse er Nasjonal Godsmodell (NGM) med dets tilhørende kostnadsmodeller dokumentert i Madslien et al. (2015), Grønland (2018) og Grønland og Pinchasik (2025). I kostnadsfunksjonene anvendes en formel for å beregne dieselforbruk som en funksjon av togets bruttovekt, basert på EcoTransit: Ecological Transport Information Tool for Worldwide Transport EcoTransIT World Initiative (2019). Formelen brukt i kostnadsfunksjonene er:

$$\text{Dieselforbruk per togkilometer} = \text{Totalvekt} \times \text{Kalibreringsfaktor} \times \text{Totalvekt}^{-0,62}$$

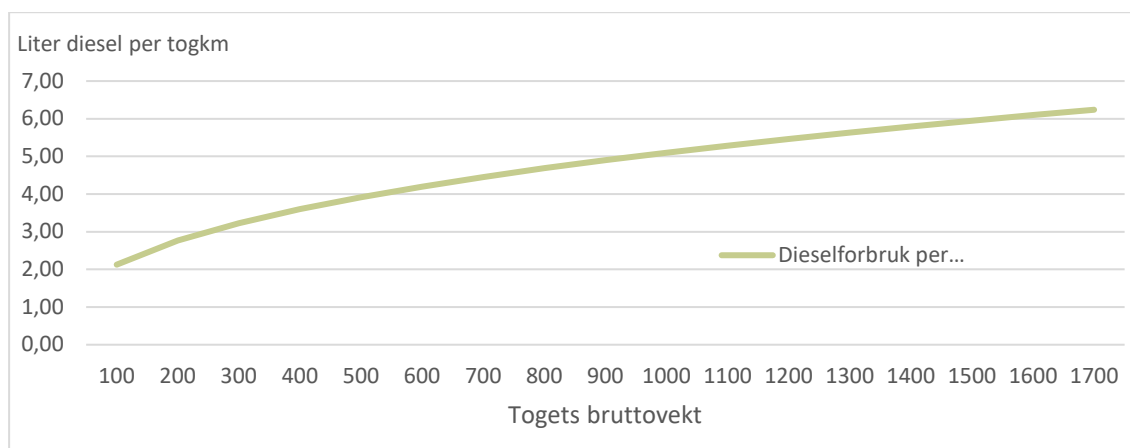
Kalibreringsfaktoren ("Energy Factor Diesel") er satt til 0,369, da det gir godt sammenfall mellom kostnadsmodellen og data på dieselforbruk delt fra CargoNet. Vi påpeker at dette representerer et anslag på gjennomsnittet. Det vil være vesentlig variasjon rundt gjennomsnittet, selv for en gitt togvekt, som drives f.eks. av eller den konkrete dieselmotoren til et gitt lokomotiv, banestrekningens topografi, eller lokførers kjørestil.

I kostnadsfunksjonene for et «typisk» godstog i NGM tas det utgangspunkt i et «typisk» kombitog¹¹ med en lengde på 480 meter og en totalvekt på 1010 tonn. Dette typiske kombitog vil da ha et dieselforbruk på 5,1 liter per togkm.

For perioden mellom 2020 og våren 2024 oppgir CargoNet dieselforbruk per togkilometer ligger mellom 4,8 og 5,4 liter per togkm. Det er ikke mulig å sammenstille togenes gjennomsnittlige totalvekt med dieselforbruket, men undersøkelse av noen typiske togtransporter mellom Bodø og Trondheim tilsier totalvekter i størrelsesordenen rundt det typiske kombitog, lagt til grunn i NGM, med noe større verdier på deler av strekningen med flere vogner og mer last, og noe mindre på andre deler av strekningen. Med utgangspunkt i formelen brukt i kostnadsfunksjon og anvendt kalibreringsfaktor, viser figur 3.4 hvordan estimert dieselforbruk per togkilometer følger togets totalvekt:

¹¹ Kombitog transporterer containere, semihengere og vekselflak som del av en intermodal transportkjede, der transporten bruker minst to av transportmidlene bil, skip, tog eller fly.

<https://www.jernbanedirektoratet.no/content/uploads/2023/11/kvu-green-vedlegg-7-begreper-og-forkortelser.pdf>



Figur 3.4: Dieselforbruk målt i liter per togkilometer som en funksjon av togets totalvekt, basert på NGMs kostnadsmodeller.

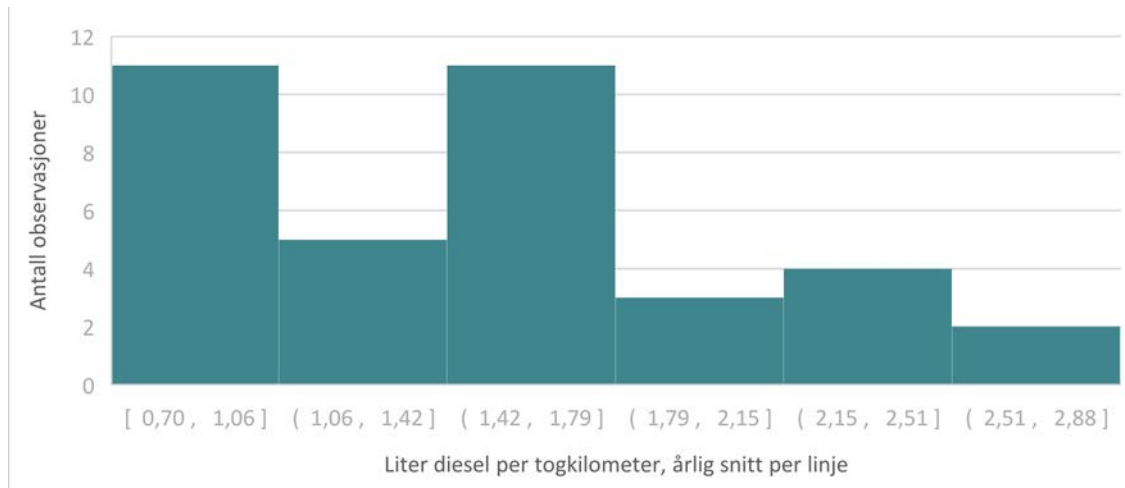
Basert på den kalibrerte kostnadsfunksjonen kan vi dermed lage en rekke illustrerende eksempelberegninger for ulike typer godstog som er representert i NGMs kostnadsmodeller. Disse vises i tabell 3.4.

Tabell 3.4: Eksempelberegninger av dieselforbruk for ulike typer godstog, basert på CargoNet-kalibrerte kostnadsmodeller til NGM.

	Tomt kombitog	Gjennomsnittlig kombitog	Fullt kombitog	Malm og mineraler, fullt (Ørtfjell - Mo i Rana)	Malm og mineraler, gjennomsnitt (Ørtfjell - Mo i Rana)
Lengde (m)	480	480	480	395	395
Vekt lokomotiv	133	133	133	266	266
Vekt vogner	484	484	484	931	931
Togvekt utenom last	617	617	617	1197	1197
Vekt av last utenom lastbærer	0	313	416	2700	1350
Bruttovekt for tog	617	1010	1143	3897	2547
Liter per togkm	4,2	5,1	5,4	8,5	7,3
Liter per tonnkilometer		0,016	0,013	0,003	0,005
Liter per bruttotonnkilometer	0,007	0,005	0,005	0,002	0,003

Persontog

Jernbanedirektoratet har delt data med prosjektet på rapportert dieselforbruk per togkm fra togoperatørene på toglinjenivå per år. Vi har data for årene 2018-2023 for totalt seks dieseldrevne toglinjer som sammenlagt kjører ca. 5,5 millioner togkilometer i snitt per år. Gjennomsnittlig dieselforbruk per togkm varierer mye mellom linjene og over år. Denne variasjonen kan vises i et histogram i figur 3.5. Drivstoffforbruket er splittet opp i seks like store intervaller for drivstofforbruk. F.eks. har vi elleve observasjoner av toglinjer med gjennomsnittlig drivstofforbruk i intervallet 0,70 til 1,06 liter diesel per togkilometer i den første kategorien, og fem observasjoner med gjennomsnittlig drivstofforbruk i intervallet 1,06 og 1,42 liter diesel per togkilometer i den andre kategorien osv.



Figur 3.5: Histogram over fordelingen av liter diesel per togkilometer, årlig snitt per toglinje, for 2018-2023.

Samlet dieselforbruk delt på samlet trafikkarbeid over hele perioden gir et gjennomsnittlig dieselforbruk på 1,72 liter per togkm. Dette blir hovedestimatet for videre beregninger av skadekostnader, men histogrammet gir en indikasjon på hvor stor spredning man kan ta utgangspunkt i, dersom det er behov for følsomhetsanalyser på denne parameteren.

3.2.2 Utslipp per liter diesel

Utslippsfaktorer anvendt i utslippsregnskapet: Statistisk Sentralbyrå (2021) oppgir utslippsfaktorer som brukes i Norges utslippsregnskap. Når vi henter utslippsfaktorer fra deres tabell 1 og tabell 17 får vi anvendbare utslippsfaktorer for CO₂, SO₂, PM_{2,5} og PM₁₀.

Utslippsfaktorer basert på operatør-data: Vi har mottatt data som oppsummerer NO_x-utslipp og drivstofforbruk fra CargoNet, fordelt på ulike dieselmotorer, for et kvartal i årene 2021, 2022 og 2024. NO_x-utslippene per liter diesel mellom ulike dieselmotorer varierer mye; fra 52 gram NO_x per liter for de mest utslippsintensive, til 12,1 gram per liter for de minst utslippsintensive (en hybridmotor). Naturlig nok vil sammensetningen av trafikkarbeidet mellom de ulike motorene ha mye å si for gjennomsnittlig NO_x-utslipp per liter. For første kvartal i 2024 var det gjennomsnittlige NO_x-utslipp på 20,3 gram per liter diesel¹². Dette blir vår anvendte utslippsfaktor.

Vi oppsummerer utslippsfaktorer (per tonn diesel) fra disse to kildene i tabell 3.5:

Tabell 3.5: Utslippsfaktorer per tonn diesel. Kilde: Statistisk Sentralbyrå (2021) og CargoNet for NO_x

	CO ₂ (tonn)	SO ₂ (kg)	PM ₁₀ (kg)	PM _{2.5} (kg)	NO _x (kg)
Utslipp per tonn diesel	3,17	0,0156	3,80	3,61	24,2

¹² NO_x-faktoren som CargoNet benytter er basert på utslippstall som er hentet inn fra deres motor- og lokomotivprodusent. Denne faktor benyttes i forbindelse med innberetning og betaling av NO_x-avgift. Dette rapporteres inn hvert kvartal til Skatteetaten og NO_x-Fondet. Denne rapportering er gjenstand for kontroll fra begge instanser. NO_x-utslipp og forbruk av diesel til togfremføring rapporteres også gjennom [Vy konsernets bærekraftsregnskap](#).

3.2.3 Utslipp og skadekostnader per togkilometer

Basert på dieselforbruket for godstog og persontog kapittel 3.2.1 og utslippsfaktorene i tabell 3.5 kan vi beregne utslipp per togkm for ulike togtyper. Dette vises i tabell 3.6:

Tabell 3.6: Utslipp per togkm for ulike dieseldrevne togtyper

Togtype	Områdetype	CO ₂ (kg)	NO _x (g)	PM fra eksos (g)	SO ₂ (g)
Persontog	Alle	4,57	37,56	5,47	0,02
Tomt kombitog	Alle	11,30	92,94	13,55	0,06
Gjennomsnittlig kombitog	Alle	13,63	112,09	16,34	0,07
Fullt kombitog	Alle	14,29	117,48	17,12	0,07
Malm og mineraler, fullt (Ørtfjell - Mo i Rana)	Alle	22,77	187,23	27,29	0,11
Malm og mineraler, gjennomsnitt (Ørtfjell - Mo i Rana)	Alle	19,37	159,29	23,22	0,10
Farlig gods, fullt tog (Sjursøya-Gardermoen)	Alle	15,68	128,98	18,80	0,08
Farlig gods, snitt tog (Sjursøya-Gardermoen)	Alle	13,64	112,14	16,35	0,07

Videre kan vi anvende verdsettingen per utslippsenhet fra kapittel 3.1 sammen med estimerte utslipp per togkm i tabell 3.6 til å lage estimater for marginale skadekostnader fra utslipp til luft per togkilometer. Dette presenteres i Tabell 3.7, hvor estimatene er brutt ned på de tre områdetypene tidligere omtalt i 3.1.2.

Tabell 3.7: Marginale skadekostnader per togkm for ulike dieseldrevne togtyper

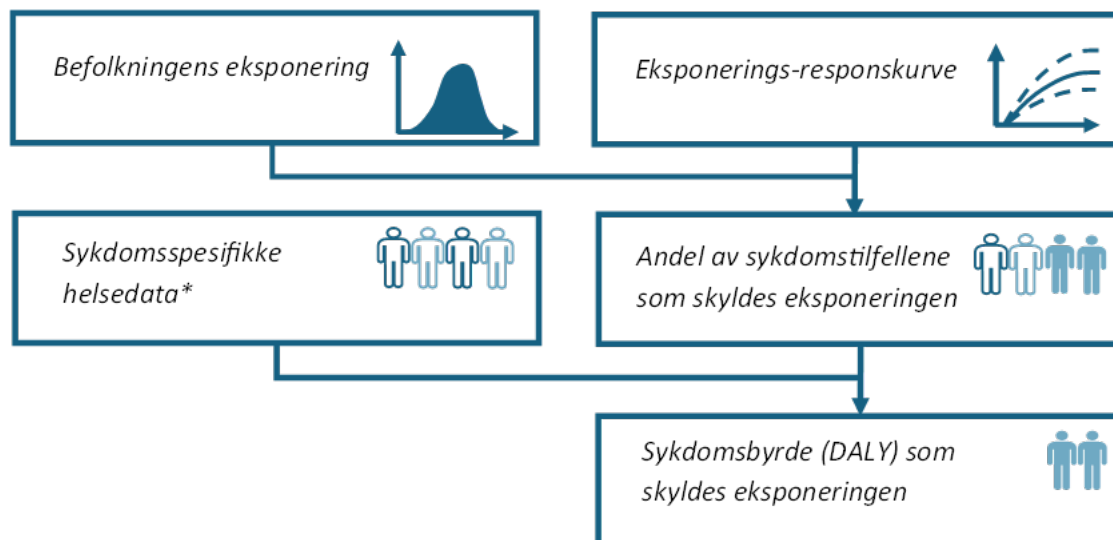
Togtype	Områdetype	kr/km CO ₂	kr/km NO _x	kr/km PM, eksos	kr/km SO ₂	SUM
Persontog	Spredt bebyggelse	6,42	0,99	0,14	0,00	7,55
Persontog	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	6,42	4,88	2,88	0,00	14,17
Persontog	Tettsted (>100 000 innb.)	6,42	21,49	25,45	0,00	53,35
Tomt kombitog	Spredt bebyggelse	15,88	2,45	0,36	0,00	18,69
Tomt kombitog	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	15,88	12,07	7,12	0,00	35,07
Tomt kombitog	Tettsted (>100 000 innb.)	15,88	53,17	62,97	0,00	132,02
Gjennomsnittlig kombitog	Spredt bebyggelse	19,15	2,95	0,43	0,00	22,53
Gjennomsnittlig kombitog	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	19,15	14,55	8,59	0,00	42,29
Gjennomsnittlig kombitog	Tettsted (>100 000 innb.)	19,15	64,12	75,94	0,00	159,21
Fullt kombitog	Spredt bebyggelse	20,07	3,10	0,45	0,00	23,62
Fullt kombitog	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	20,07	15,26	9,00	0,00	44,33
Fullt kombitog	Tettsted (>100 000 innb.)	20,07	67,20	79,60	0,00	166,87
Malm og mineraler, fullt (Ørtfjell - Mo i Rana)	Spredt bebyggelse	31,99	4,94	0,72	0,00	37,64
Malm og mineraler, fullt (Ørtfjell - Mo i Rana)	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	31,99	24,31	14,34	0,00	70,64
Malm og mineraler, fullt (Ørtfjell - Mo i Rana)	Tettsted (>100 000 innb.)	31,99	107,10	126,85	0,00	265,94
Malm og mineraler, gjennomsnitt (Ørtfjell - Mo i Rana)	Spredt bebyggelse	27,21	4,20	0,61	0,00	32,02
Malm og mineraler, gjennomsnitt (Ørtfjell - Mo i Rana)	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	27,21	20,68	12,20	0,00	60,10
Malm og mineraler, gjennomsnitt (Ørtfjell - Mo i Rana)	Tettsted (>100 000 innb.)	27,21	91,12	107,92	0,00	226,25

3.3 Utslippskostnader for PM_{2.5} og NO₂ for Trondheim og Bodø – metode fra Verdsettingsprosjektet

FHI har utviklet en ny metode for å estimere marginale skadekostnader for helseeffektene av PM_{2.5} og NO₂. Metoden baseres på å omregne alt helsetap fra disse to luftforurensningskomponentene til en felles indikator – helsetapsjusterte leveår (*Disability-Adjusted Life Years, DALY*). DALY er summen av tapte leveår og år levd med helsetap, og er et sentralt samlemål for sykdomsbyrde i en befolkning (Chen et al., 2015). Det globale sykdomsbyrdeprosjektet (*Global Burden of Disease, GBD*) beregner DALY for totalt 87 risikofaktorer for alle land i verden (Murray et al., 2020), og for luftforurensning beregner de for PM_{2.5} og NO₂. Transportstøy er ikke inkludert i dette internasjonale prosjektet, men Verdens helseorganisasjon (WHO) og det Europeiske Miljøbyrået (European Environmental Agency, EEA) beregner DALY for støy fra veg, bane og luftfart for Europa (EEA, 2025; WHO, 2011). For å beregne sykdomsbyrden i form av DALY knyttet til en risikofaktor kreves tre sentrale datakilder/inngangsdata:

1. befolkningens eksponering (*Population Exposure Distribution, PED*),
2. eksponerings-respons-funksjon (ERF)
3. sykdomsspesifikke helsedata (*Burden of Disease, BoD*), det vil si bakgrunnshelsedata i befolkningen

Vi starter med en gjennomgang av DALY-metoden for beregninger der eksponerings-responsfunksjonen er basert på relativ risiko figur 3.6.



Figur 3.6: Metodisk rammeverk for beregning av tilskrivbar sykdomsbyrde basert på eksponerings-respons-sammenhenger uttrykt som relativ risiko.

Befolkningens eksponeringsfordeling (PED) viser det totale antallet, eller andelen, av befolkningen (PE) som er eksponert i en bestemt eksponeringskategori/eksponeringsnivå i (f.eks. kategorien 5–6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM_{2.5}); mens eksponerings-respons-funksjonen (ERF) beskriver sammenhengen mellom konsentrasjonen/eksponering av forurensning og relativ risiko (RR) for en gitt sykdom eller helseutfall (Plass et al., 2022). Dermed betegner RR_i den relative risikoen ved eksponeringsnivå i , og PE_i andelen av befolkningen som er eksponert i eksponeringskategori i . Kombinasjonen av ERF og PE muliggjør beregning av befolkningens tilskrivbare andel (*Population Attributable Fraction, PAF*) etter følgende formel:

$$PAF = \frac{\sum_i RR_i * PE_i - 1}{\sum_i RR_i * PE_i} \quad (1)$$

PAF representerer andelen av sykdomsbyrden i befolkningen som kan tilskrives den aktuelle risikofaktoren. Denne andelen kombineres deretter med grunnlagsdata for en spesifikk sykdom (BoD), ofte uttrykt i helsetapsjusterte leveår (DALYs), for å beregne den tilskrivbare sykdomsbyrden $A_{BoD} = PAF * BoD$ (Figur 3.6).

Metoden for å beregne DALY som skissert i Figur 3.6 gjøres separat for hvert eksponerings-responspar. Et eksempel på et eksponerings-responspar er $PM_{2.5}$ og lungekreft. Når beregningene av DALY for hver sykdom som kan tilskrives en risikofaktor (f.eks. $PM_{2.5}$) er gjort, summeres disse til total DALY som kan tilskrives risikofaktoren.

Basert på DALY-tilnærmingen bygger metoden for estimering av marginal skadekostnad for helseeffektene av luftforurensning, videre på ideen om å derivere PAF og ERF med hensyn på eksponeringsnivå. Gitt at x er enheten for konsentrasjon ($\mu g/m^3$), representerer x også x-aksen i både eksponerings-respons-funksjonen (ERF) og befolkningens eksponeringsfordeling (PED) (se de to øverste illustrasjonene i Figur 3.6). Selv om det ut fra ligning (1) er tydelig at PAF ikke avhenger direkte av konsentrasjon x , gjør både ERF og PED det. Når vi omskriver ligning (1) for å inkludere x , får vi:

$$PAF = \frac{\sum_i RR_i(x) * PE_i(x) - 1}{\sum_i RR_i(x) * PE_i(x)} \quad (2)$$

Ved å ta den deriverte $\frac{dPAF}{dx}$, får vi den marginale PAF-en for én enhet økning i konsentrasjon som:

$$\frac{dPAF}{dx} = \frac{\sum_i \left[\frac{dRR_i(x)}{dx} * PE_i(x) + RR_i(x) * \frac{dPE_i(x)}{dx} \right]}{[\sum_i RR_i(x) * PE_i(x)]^2} \quad (3)$$

med $\frac{dRR_i(x)}{dx}$ som er den deriverte av ERFen og $\frac{dPE_i(x)}{dx}$ som er den deriverte av befolkningens eksponeringsfordeling. Men siden befolkningens eksponeringsfordeling i praksis er en databasert konstruksjon basert på eksponerings- og befolkningsdata – og ikke en faktisk fordelingsfunksjon – har denne deriveringen ingen praktisk betydning. Ulike geografiske områder og tidspunkter gir unike befolkningseksponeringsfordelinger, og selv om man kunne derivert, $\frac{dPE_i(x)}{dx}$, antar vi at resultatet ikke innebærer stor forskjell og dermed settes den deriverte av befolkningens eksponeringsfordeling til null. Vi forenkler derfor ligning (3) ved å utelate leddet $RR_i(x) \frac{dPE_i(x)}{dx}$, og står igjen med:

$$\frac{dPAF}{dx} = \frac{\sum_i \left[\frac{dRR_i(x)}{dx} * PE_i \right]}{[\sum_i RR_i(x) * PE_i]^2} \quad (4)$$

Fra ligning (4) kan den marginale tilskrivbare sykdomsbyrden, eller tilskrivbar DALY (A_{BoD}), beregnes som:

$$\frac{dA_{BoD}}{dx} = BoD * \frac{\sum_i \left[\frac{dRR_i(x)}{dx} * PE_i \right]}{[\sum_i RR_i(x) * PE_i]^2} \quad (5)$$

Gitt at c er kostnaden per DALY, og C representerer den marginale helsekostnaden per konsentrasjonsenhet for en risikofaktor, kan C beregnes som:

$$C = c * \frac{dA_{BoD}}{dx} = c * BoD * \frac{\sum_i \left[\frac{dRR_i(x)}{dx} * PE_i \right]}{[\sum_i RR_i(x) * PE_i]^2} \quad (6)$$

For å beregne den marginale kostnaden per konsentrasjonsenhet per person, kan vi dele den totale kostnaden C på antall personer i det aktuelle geografiske området – inkludert både de som er eksponert for forurensning og de som ikke er det. Når det gjelder luftforurensning, er det tradisjon for å gjennomføre analyser på utslippsnivå snarere enn konsentrasjonsnivå (Magnussen et al., 2019; Magnussen et al., 2010; Miljødirektoratet, 2020, 2023; SFT, 2005). For å oppnå dette målet, må man først beregne den marginale økningen i konsentrasjon per utslippsenhet, og deretter multiplisere denne raten med $\frac{dA_{BoD}}{dx}$. Når det gjelder enheter, kan dette uttrykkes som

$$\frac{DALY}{\frac{\mu g}{m^3}} * \frac{\frac{\mu g}{m^3}}{tonn utslipp} = \frac{DALY}{tonn utslipp} \quad (7)$$

Dette gir sykdomsbyrde per tonn utslipp.

Sykdomsbyrden beregnes i form av i helsetapsjusterte leveår (DALY). Dette er i tråd med Helse- og helsedirektoratets anbefalinger om å bruke DALY/QALY i samfunnsøkonomiske analyser (Helsedirektoratet, 2024), hvor man legger til grunn verdien av et statistisk leveår iht. Finansdepartementets rundskriv om samfunnsøkonomiske analyser (Finansdepartementet, 2021b). Denne tilnærmingen sikrer en harmonisert metode for å vurdere helsekonsekvenser på tvers av risikofaktorer og sektorer.

For luftforurensning har vi beregnet marginale skadekostnader for helseeffekter av PM_{2.5} og NO₂. Nedenfor beskrives de ulike inngangsdata, eksponerings-responsfunksjoner og bakgrunns helsedata som er lagt til grunn for beregningene.

3.3.1 Befolkningens eksponeringsfordeling

Som vist i figur 3.6 og omtalt over, trenger vi data på befolkningens eksponering for å beregne tilskrivbar DALY. Konsentrasjonsdataene for både PM_{2.5} og NO₂ ble hentet fra MET sin modell uEMEP¹³ for 2021. Datasettene er basert på interpolerte konsentrasjonsraster, der måledata fra stasjoner er kombinert med statistiske modeller gjennom en metode kjent som "regression-interpolation-merging mapping". Dette gir et griddet (rutenett) datasett som dekker hele Norge og er egnet for sammenlignbar bruk i helserelaterte vurderinger. Dataene er tilgjengelige i GeoTIFF-format og inkluderer årlige gjennomsnitt for blant annet PM_{2.5} og NO₂.

Romlige konsentrasjonsdata må videre kombineres med romlige data på befolkning for å lage eksponeringsfordelinger (PED). Vi hentet befolkningsdata fra Copernicus Global Human Settlement Layer GHPOP R2023A (Schiavina et al., 2023). Dette gir et globalt rutenett med høyoppløselige befolkningsdata. Datasettet viser den romlige fordelingen av befolkningen for flere tidsperioder og er utviklet for å støtte analyser av bosettingsmønstre, urbanisering og eksponering. Det bygger på en kombinasjon av fjernmålingsdata, statistiske befolkningsdata og geografiske modeller for å produsere konsistente estimater av antall bosatte personer per rute. Dataene er tilgjengelige i rasterformat (bildefiler med

¹³ <https://emep.met.no/>

pikslar) og kan enkelt kombineres med miljø- og helsedata for analyser av risiko og eksponering. GHSPOP R2023A inkluderer hele Norge og gir et detaljert grunnlag for beregning av befolkningsfordeling på lokalt nivå. Datasettene er gratis tilgjengelige og benyttes ofte i både forskning og politikktutforming. I vår analyse kombinerte vi dette datasettet med våre eksponeringsdata for å beregne befolknings eksponeringsfordeling (PED).

3.3.2 Eksponerings-responsfunksjoner

Eksponerings-respons-funksjoner (ERF-er) for $PM_{2.5}$ og NO_2 ble brukt for å beregne sykdomsbyrde (DALY) knyttet til luftforurensning. Det ble benyttet ERF-er i form av MRBRT (*Meta-Regression—Bayesian, Regularized, Trimmed*) utviklet av det Globale sykdomsbyrdeprosjektet (*Global Burden of Disease*, GBD) for totalt syv sykdommer hvor seks av dem er forbundet med $PM_{2.5}$: iskemisk hjertesykdom, hjerneslag, nedre luftveisinfeksjoner, kols, diabetes, lungekreft, og en sykdom assosiert med NO_2 - astma. MRBRT-funksjonene som ble brukt, stammer fra 2021-versjonen (GBD, 2021; Ghosh et al., 2021), siden oppdaterte data fra GBD, 2023 ennå ikke var publisert på tidspunktet for denne analysen. MRBRT gir fleksible og robuste estimater av risiko basert på store mengder epidemiologiske data. Disse estimatene er sentrale i beregningen av sykdomsbyrde (DALY) knyttet til langtidseksponering for luftforurensning.

Et teoretisk minste risikonivå (*theoretical minimum risk exposure level*, TMREL) for $PM_{2.5}$ og NO_2 ble også inkludert i analysen. Vi valgte gjennomsnittsverdien av hvert TMREL-intervall for videre beregninger (GBD, 2021). For $PM_{2.5}$ er TMREL i området 2,4 til 5,9 $\mu g/m^3$, og gjennomsnittsverdien som ble brukt var dermed 4,15 $\mu g/m^3$. For NO_2 er TMREL i området 4,6 til 6,2 $\mu g/m^3$, med en brukt gjennomsnittsverdi på 5,4 $\mu g/m^3$. Inkluderingen av TMREL sikrer at beregningene tar hensyn til et nivå der det under dette ikke forventes helseskadelige effekter, i tråd med metodikken fra GBD-studiene.

3.3.3 Helsedata i befolkningen

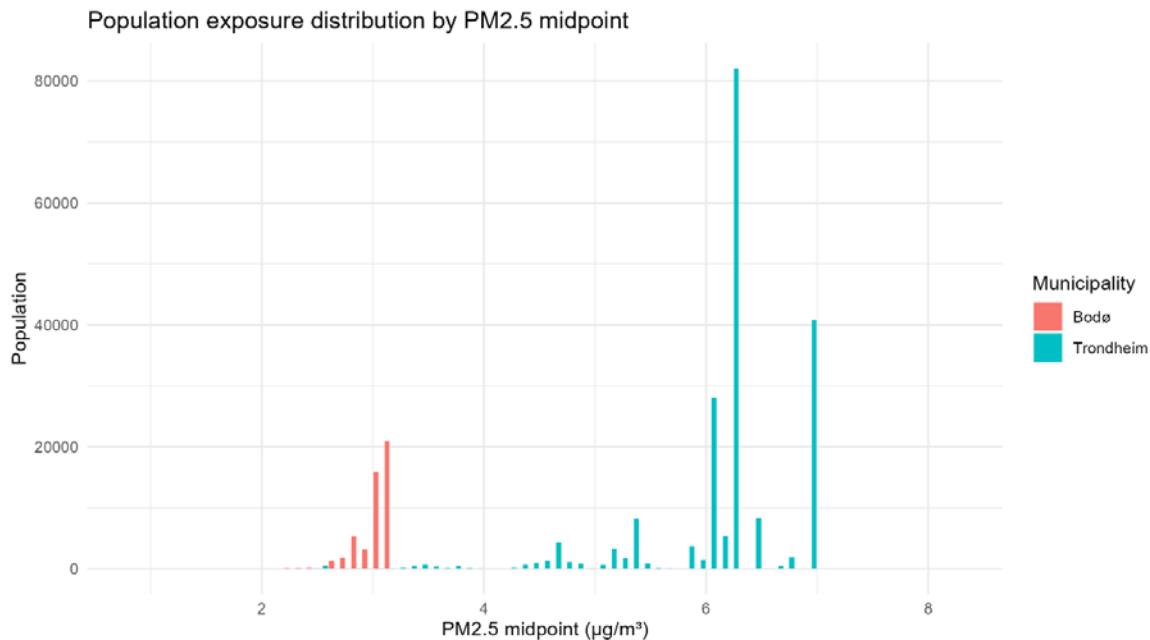
Helsedata i befolkningen ble hentet fra publiserte data fra Global Burden of Disease i 2021 (GBD, 2021). Basert på data tilgjengelig på fylkesnivå, har vi utviklet metoder i samarbeid med Senter for Sykdomsbyrder ved FHI for å fremskaffe tilsvarende data på kommunenivå.

3.3.4 Resultater

Gitt dette kapittelets naturlige søkelys på dieseltog, er vi interessert i å undersøke marginale skadekostnader for byene hvor flest personer potensielt kan bli eksponert for lokal luftforurensning fra dieseltog, dvs. Trondheim og Bodø. Vi bygger opp regnestykket for marginale skadekostnader skritt for skritt.

Marginale skadekostnader fra $PM_{2.5}$

I tabell 3.8 viser vi DALY for de relevante helseutfallene for $PM_{2.5}$; iskemisk hjertesykdom, hjerneslag, nedre luftveisinfeksjoner, kols, diabetes og lungekreft, i Trondheim og Bodø (bakgrunns helsedata), dette er altså den totale sykdomsbyrden per år fra hver sykdom uavhengig av årsak til sykdommen. Videre vises den beregnede andelen av hver sykdom som kan tilskrives $PM_{2.5}$ og videre estimerte DALY som forårsakes av utslipp av $PM_{2.5}$, med tilhørende kostnader. Kostnad per DALY er satt til 1,68 mill. NOK₂₀₂₃ iht. ^(Oslo)Helsedirektoratet (2024) DALY i Bodø som kan tilskrives $PM_{2.5}$ -utslipp er null. Det er fordi konsentrasjonene i Bodø er lavere enn terskelverdien på 4,15 $\mu g/m^3$. Dette vises i figur 3.7.



Figur 3.7: Befolkningens eksponering til PM2.5 i Bodø og Trondheim i 2021

I figur 3.8 ser vi at de seks helseutfallene totalt årlig bidrar til 9100 DALY i Trondheim og 2629 DALY i Bodø (Helsedata i befolkningen). I Trondheim er det estimert at mellom 2,3 % (hjerneslag) og 5,1 % (diabetes) kan tilskrives eksponering for PM_{2,5}, og samlet for alle sykdommene er estimert helsetap fra PM_{2,5} i Trondheim på 283 DALY i året. I Bodø er konsentrasjonene såpass lave at det ikke kan attribueres noen DALY til eksponeringen av PM_{2,5}. Dette betyr at skadekostnaden ved en marginal økning i konsentrasjoner i Bodø fra dagens lave nivåer estimeres til null. I de videre tabellene under vil vi derfor kun vise resultater fra Trondheim.

Tabell 3.8: DALY-effekten av helseutfall som kan forårsakes av eksponering til PM_{2,5}.

Kommune	Helseutfall	Helsedata i befolkningen	Total PAF ¹⁴ (%)	DALY	DALY kostnad (mill NOK)	Gjennomsnitt DALY kostnad (mil NOK/tonn)
Trondheim	Iskemisk hjertesykdom	2620	3,4	90	151,1	0,834
Trondheim	Hjerneslag	1735	2,3	39	66,2	0,366
Trondheim	Nedre luftveisinfeksjoner	574	3,4	20	32,8	0,181
Trondheim	Kols	1657	2,5	42	69,9	0,386
Trondheim	Diabetes	1086	5,1	56	93,5	0,516
Trondheim	Lungekreft	1428	2,5	36	59,7	0,330
Trondheim	Alle 6 helseutfall	9100		283	473,2	2,612
Bodø	Iskemisk hjertesykdom	734	0	0	0	0
Bodø	Hjerneslag	438	0	0	0	0
Bodø	Nedre luftveisinfeksjoner	201	0	0	0	0
Bodø	Kols	466	0	0	0	0
Bodø	Diabetes	301	0	0	0	0
Bodø	Lungekreft	489	0	0	0	0
Bodø	Alle 6 helseutfall	2629		0	0	0

¹⁴ PAF står for Population Attributable Fraction dvs. befolkningens tilskrivbare andel, oppgitt i prosent i tabell 2.9

I figur 3.9 ser vi på hvordan beregnet utslag på DALY og monetære skadekostnader er ved en marginal økning i konsentrasjon i Trondheim.

Tabell 3.9: Beregnet utslag på DALY og monetære skadekostnader per år ved en marginal økning i $PM_{2,5}$ konsentrasjon og utslipp i Trondheim.

Helseutfall	Marginal DALY per $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Marginalkostnad per $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (mill NOK)	Marginalkostnad per $\mu\text{g}/\text{m}^3$ per person (NOK)	Konsentrasjons-økning per utslippsenhet ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ per tonn)	Marginalkostnad per kg utslipp (NOK/kg)
Iskemisk hjertesykdom	31,6	53,1	264,6	0,011	569
Hjerneslag	13,4	22,6	112,6	0,011	242,2
Nedre luftveisinfeksjoner	5,2	8,7	43,4	0,011	93,3
Kols	16,6	27,9	139,1	0,011	299,2
Diabetes	38,1	64	318,8	0,011	685,7
Lungekreft	12	20,2	100,5	0,011	216,1
Totalt 6 helseutfall	116,9	196,4	979	0,011	2105,5

Oppsummert viser Tabell 3.9 at estimert marginal skadekostnad for å øke utslipp med en kilo i Trondheim er på ca. 2 106 kr. Dette er en sum av de seks helseutfallene, hvor iskemisk hjertesykdom er den mest utslagsgivende. Estimaten av de marginale skadekostnadene er ikke direkte sammenlignbare med skadekostnadene for PM_{10} i tabell 3.1, bl.a. på grunn av forskjellene mellom $PM_{2,5}$ og PM_{10} , forskjeller i datagrunnlag og forskjeller i metodikk. Blant annet inkluderes ikke noe betalingsvillighet for å redusere utslippskonsentrasjoner fra de som opplever utslippene som brysomme, men som ikke er aktuelle for noen diagnose relatert til støypplage. Det er imidlertid åpenbart at de nye estimatene innebærer marginale skadekostnader av en lavere størrelsesorden. Dette gjennomgås nærmere i diskusjonen i neste delkapittel.

Marginale skadekostnader fra NO_2

I tabell 3.10 ser vi at helsetap knyttet til astma årlig bidrar til 387 DALY i Trondheim og 123 DALY i Bodø. Mellom 3,2 % og 14,2 % av disse helsetapene kan tilskrives eksponering for NO_2 . I Trondheim og Bodø innebærer dette et årlig helsetap på henholdsvis 55 og 4 DALY attribuert til dette utslippet i året, som kan oversettes til årlige skadekostnader på henholdsvis 92 og 7 millioner kroner.

Tabell 3.10: DALY-effekten av helseutfall som kan forårsakes av eksponering til NO_2 .

Kommune	Helseutfall	Helsedata i befolkningen	Total PAF (%)	DALY	DALY kostnad (mil NOK)	Gjennomsnitt DALY kostnad (mil NOK/tonn)
Trondheim	Astma	387	14,2	55	92,40	0,164
Bodø	Astma	123	11,8	15	24,47	0,132

I Tabell 3.11 ser vi på hvordan beregnet utslag på DALY og monetære skadekostnader er ved en marginal økning i NO_2 -konsentrasjonen i Trondheim og Bodø.

Tabell 3.11: Beregnet utslag på DALYer og monetære skadekostnader per år knyttet til astma ved en marginal økning i NO_2 konsentrasjon og utslipp i Trondheim.

Kommune	Marginal DALY per $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Marginalkostnad per $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (mill NOK)	Marginalkostnad per $\mu\text{g}/\text{m}^3$ per person (NOK)	Konsentrasjons-økning per utslippsenhet ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ per tonn)	Marginalkostnad per tonn utslipp (NOK/tonn)
Trondheim	9,847	16,54	82,45	0,0080	131,69
Bodø	3,99	6,70	136,72	0,0016	10,84

Oppsummert viser tabell 3.11 at estimert marginal skadekostnad fra å øke NO₂-utslippet utslipp med 1 kg i Trondheim er på ca. 131,7 kr, mens det i Bodø er på ca. 10,8 kr. Forskjellen drives både av at økningen i antall DALY er nesten dobbelt så høy i Trondheim som i Bodø (som er mindre enn hva befolkningen skulle tilsi) for en økning på 1 µg/m³ i konsentrasjon, men også av at det å slippe ut ett tonn NO₂ i Bodø gir bare 20% så sterk effekt på konsentrasjonen som i Trondheim.

Estimatene av de marginale skadekostnadene er ikke direkte sammenlignbare med skadekostnadene for NO_x i Tabell 3.2 bl.a. på grunn av forskjellene mellom NO₂ og NO_x, forskjeller i datagrunnlag og forskjeller i metodikk. Det er imidlertid åpenbart at de nye estimatene innebærer marginale skadekostnader av en lavere størrelsesorden. Dette gjennomgås nærmere i diskusjonen i neste delkapittel.

3.3.5 Diskusjon

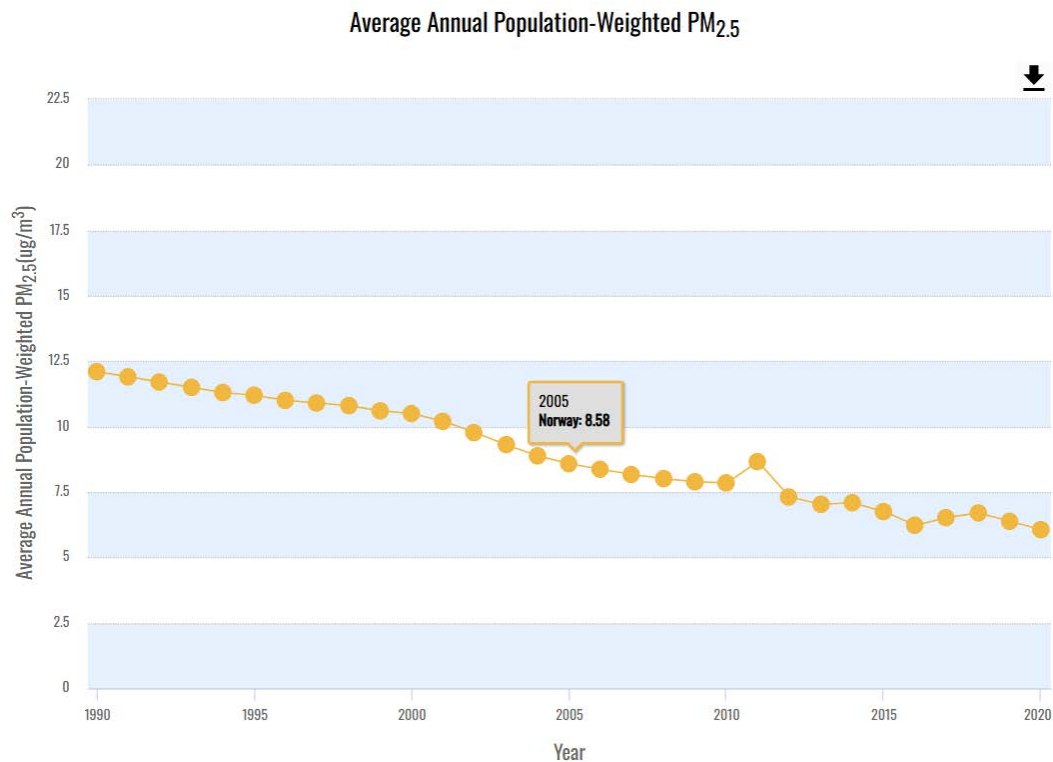
FHIs metode for å beregne skadekostnader for helseeffekter av luftforurensning skiller seg på flere viktige punkter fra den tidligere metoden som ble brukt i LEVE-prosjektet, hvis tilhørende resultater fra 2005 har blitt brukt og anvendt bredt i årene etter (SFT, 2005).

For det første baserer FHI seg på oppdaterte luftforurensningsdata av PM_{2.5} og NO₂ med mer detaljerte eksponeringsberegninger. Istedenfor å gjøre beregningene basert på gjennomsnittsnivåer av luftforurensning i befolkningen (for en gitt kommune) som i LEVE-prosjektet, bruker vi eksponeringsfordelinger per kommune. Nivåene av luftforurensningskomponentene er hentet fra Meteorologisk institutt som beregner disse nivåene for hele Norge og alle kommuner basert på uEMEP¹⁵. Videre baseres vår metode på oppdatert kunnskap om sammenhenger mellom luftforurensnings-komponentene og risiko for sykdom/død (ERFer) fra det Globale sykdomsbyrdeprosjektet (GBD). Metoden beregner alt helsetap og for tidlig død om til helsetapsjusterte leveår (DALY) som verdsettes.

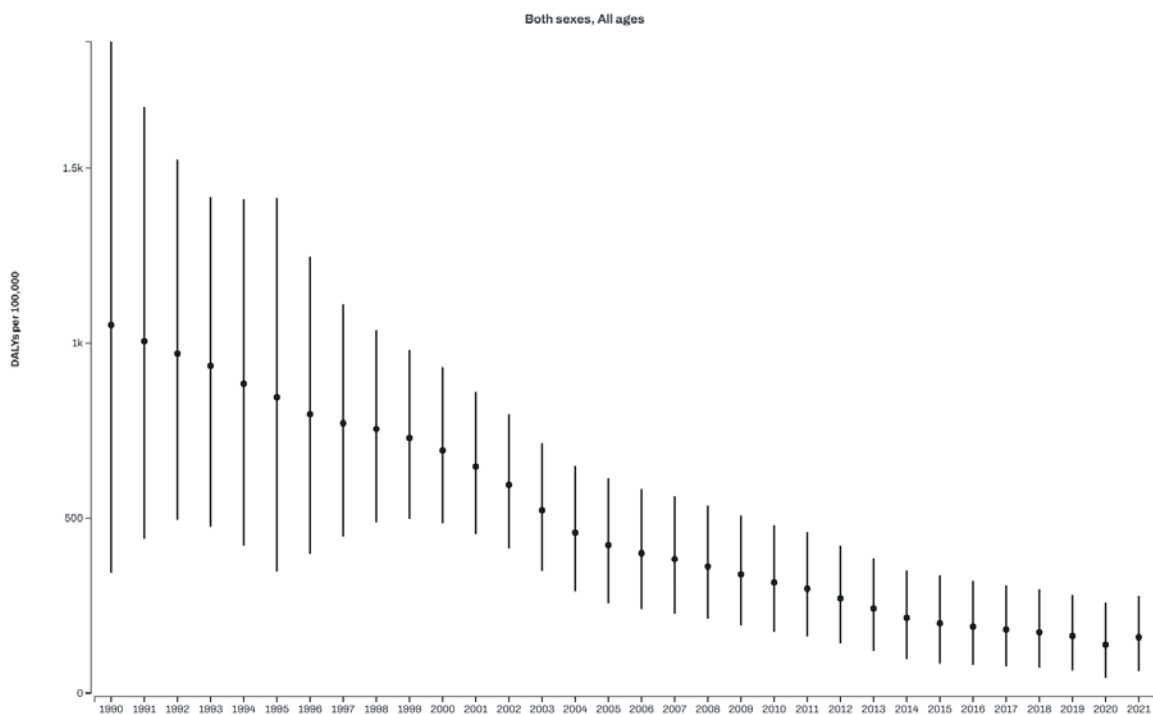
Metoden som ble brukt i LEVE-prosjektet (SFT, 2005), bygger på «Skadekostnadsfunksjon»-tilnærmingen (se f.eks. Maibach et al., 2008). Denne ble opprinnelig utviklet innen miljø-økonomi og senere tatt i bruk for å beregne samfunnskostnader ved luftforurensning og støy. Den marginale samfunnskostnaden (MSC) uttrykkes som endringen i fysisk effekt (ΔE) multiplisert med enhetspris (PRE) per effekt, delt på endringen i utslipp eller eksponering (ΔU) (SFT, 2005). Kjernen i metoden er beregningen av ΔE – det vil si antall ekstra tilfeller eller skader som skyldes endret eksponering. Dette estimeres basert på eksponerings-respons-funksjoner, eksponeringsnivå, befolkningsstørrelse og baseline-risiko. Når effektene er kvantifisert, verdsettes de økonomisk gjennom enhetspris, som kan være alt fra medisinske kostnader til betalingsvillighet (WTP) eller verdien på et statistisk liv.

Selv om beregningsprinsippet kan fremstå som likt, finnes det flere vesentlige forskjeller mellom de to metodene. På grunn av manglende tilgjengelighet på eksponeringsdata tok den tidligere metoden bare i begrenset grad høyde for endringer i befolkning, eksponering og risiko. Dette innebærer at metoden ikke fanger opp funksjonstap eller ulikheter i helseeffekter mellom befolkningsgrupper. Videre fokuserte LEVE-prosjektet utelukkende på PM₁₀ og NO_x, mens nyere forskning har vist at PM_{2.5} og NO₂ har en sikrere og sterkere årsakssammenheng med sykdom og for tidlig død (World Health Organization, 2021). Dermed skiller metodene seg også når det gjelder valg av forurensningskomponenter. I tillegg har det vært vanlig praksis å oppjustere resultatene fra 2005 med inntekts- og prisnivået i dag, noe som naturlig nok gir betydelig høyere kostnadsestimater etter 15–20 år. En slik prisjustering tar imidlertid ikke hensyn til den positive utviklingen med redusert luftforurensning i Norge de siste to tiårene. Utslippene av særlig PM_{2.5} har blitt betydelig redusert de siste 25 årene og dermed også nivåene som befolkningen blir eksponert for (se figur 3.8). Den totale sykdomsbyrden av luftforurensning har dermed gått kraftig ned i samme periode (se figur 3.9).

¹⁵ <https://emep.met.no/>



Figur 3.8: Utvikling i gjennomsnittlig befolkningsvektet eksponering for PM_{2.5} fra 1990 til 2020. Kilde: [Stateofglobalair.org](https://stateofglobalair.org)



Figur 3.9: Utvikling i estimerte helsetap, målt i DALYs, som følge av eksponering for PM_{2.5}. Kilde: vizhub.healthdata.org

En annen faktor som trolig har bidratt betydelig til at estimerte skadekostnader er lavere med vår nye metode, er at det er benyttet en terskel i beregningene av tilskrivbar DALY. Tidligere beregninger er gjort med antagelse om at det ikke er noen nedre grense/terskel for helsekonsekvenser av luftforurensning og har derfor beregnet helsetap helt ned mot 0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Helseeffektene av eksponering for $\text{PM}_{2,5}$ nivåer under 4-5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ er svært usikre, da studier som ERF-ene er basert på ikke har målt/beregnet så lave eksponeringsnivåer. Vi har derfor basert oss på terskler som er benyttet i GBD (GBD, 2021) som omtalt i avsnitt om eksponeringsresponsfunksjoner. Disse forskjellene mellom de to metodene vil føre til ulike kostnadsestimater. Per definisjon vil det å sette en høyere terskel for utslippskonsentrasjoner, redusere muligheten for å attribuere helseutfall til utslipp. Dette fører igjen isolert sett til lavere estimater for marginale skadekostnader.

FHI har foreløpig beregnet marginale skadekostnader for to kommuner, Trondheim og Bodø. I Verdsettingsprosjektet skal FHI oppdatere enhetskostnadene for flere kommuner for å få et bredere kunnskapsgrunnlag. Fram til dette kunnskapsgrunnlaget er på plass er anbefalingen i denne rapporten å videreføre estimatene for marginale skadekostnader for PM_{10} og NO_x . Dersom man i perioden før ferdigstilling av Verdsettingsprosjektet har en analyse hvor verdsettingen av lokale utslipp kan være utslagsgivende, anbefaler vi å gjennomføre en følsomhetsanalyse ved å teste ut implikasjonene av 75 % lavere verdsetting av PM_{10} og NO_x (eller marginal tiltakskostnad, om dette er høyere).

4 Ulykker

4.1 Eksterne kostnader av transportulykker

Ulykker i transport kan medføre skader på personer, av ulik skadegrad, og det kan medføre materielle skader. Mens tidligere rapporter om marginale eksterne kostnader i transport kun har inkludert personskader (f.eks. Rødseth et al., 2020, kap. 7), så vil vi i dette kapitlet inkludere *både* personskader og materielle skader.

Det er her viktig å understreke vår tilnærming til hva vi mener med, eller hvordan vi analyserer/måler, *eksterne* kostnader. I tidligere analyser har utgangspunktet (eksplisitt eller implisitt) vært å skulle estimere de *resterende* eksterne kostnadene gitt at deler av de eksterne kostnadene evt. allerede var «internaliserte» via reisedistanse-/drivstoffavgifter eller forsikringsordninger (Eriksen et al., 1999; Jansson, 1994; Vickrey, 1968). Våre analyser i denne rapporten, som i Rødseth et al. (2020), er imidlertid baserte på å analysere eksterne effekter uavhengig av hvorvidt deler av disse allerede er internaliserte via f.eks. distansebaserte avgifter. Dette følger også tilnærmingen i Cowi (2004) og Thune-Larsen et al. (2014).¹⁶

For ulykker er det også viktig å påpeke at den eksterne kostnaden som tilordnes de ulike transportmidlene er gitt uavhengig av hvilken transportaktør som evt. kunne gis skylden for å ha årsaket ulykken og skadene. Det er den faktiske skadedata-baserte skadefordelingen som styrer dette, dvs. styrer den «fysiske» eksternaliteten, skaden på motparten i en kollisjon. Dette er en enklere og mindre problematisk framgangsmåte enn den mulige alternative tilnærmingen, å skulle basere fordelingen av fysisk ekstern kostnad på fordeling av skyld (Maibach et al., 2008).

Skadene som vi selv kan bli påført i transportulykker inneholder også en *intern* kostnadskomponent, noe vi selv i noen grad kan kontrollere i transportmiddelvalg/-atferd. Risikoen for selv å bli skadet, eller bli skadet om bord på det transportmiddelet man er passasjer, er en risiko man har en villighet til å betale for å få redusert, f.eks. via avgifter eller forsikringsordninger. Denne ex-ante-verdsettingen vil også dekke forventede kostnader for individet om en ulykke skulle inntreffe. Når ulykker skjer vil det også påløpe (ex-post) kostnader for samfunnet, som redningstjenester, politi og helsevesen, og dette vil regnes som eksterne (system)kostnader.

For analysen av marginale eksterne kostnader av materielle skader ved ulykker, vil vi understreke at vi her bygger på et begrenset datagrunnlag. Denne delen av kapitlet vil først og fremst vil illustrere en framgangsmåte og presentere estimater som må kunne regnes som relativt usikre, som grove anslag.

4.2 Metodevalg

4.2.1 Personskader i ulykker

Fra Lindberg (2001, 2005) har vi følgende generelle formel for den marginale eksterne personskadekostnaden:

¹⁶ Rødseth et al. (2020) sammenholdt, i etterkant, drivstoffavgifter og andre distansebaserte avgifter med de samlede estimerte marginale eksternkostnadene, for personskade ved ulykke, luftforurensing, osv., for ulike transportmidler. De estimerte med dette hvor store andeler av de eksterne kostnadene som er internaliserte, i den betydning at transportbrukerne må ta hensyn til en ekstra kostnad, en avgift pga. de eksterne effektene, i beslutningene om sitt reisevolum. Fridstrøm (1999, 2011) har problematisert forsikringsordninger som mekanisme for å internalisere eksterne kostnader av transportatferd.

$$\text{Marginal ekstern personskadekostnad} = (1-\vartheta+E)ra+(1+E)rc \quad [1]$$

Her er:

r : Skaderisiko (risikoen for at en transportaktør skader egen fører og/eller evt. egne passasjerer/ansatte, pluss risikoen for å skade evt. motpart-fører/-passasjerer/-ansatte)

ϑ : Andelen av skaden som transportaktøren påfører seg selv (fører pluss evt. passasjerer/ansatte)

E : Risikoelastisitet, den relative endringen i risikoen mht. den relative endringen i kjøretøyets transportvolum, i vårt tilfelle: togenes trafikkarbeid

a og c : Henholdsvis ex-ante-verdsettingen og ex-post-kostnaden.

Uttrykket i [1] kan også skrives på følgende måte:

$$\text{Marginal ekstern personskadekostnad} = Er(a+c)+(1-\vartheta)r(a+c)+\vartheta rc \quad [2]$$

Omskrivingen tydeliggjør de tre kostnadskomponentene som inngår i den marginale eksterne personskadekostnaden (Elvik, 1994; Jansson, 1994):

- trafikkvolumeksternaliteten, $Er(a+c)$,
- den fysiske eksternaliteten, $(1-\vartheta)r(a+c)$, og
- systemeksternaliteten, ϑrc .

Fortegnet til trafikkvolumeksternaliteten vil følge fortegnet til risikoelastisiteten; og uten videre informasjon om risikoelastisiteten i jernbanetransporten, så vil vi sette denne til 0 (Rødseth et al., 2020), og da blir også trafikkvolumelastisiteten 0. Den fysiske eksternaliteten øker med den andelen av skaden som påføres motparten ($1-\vartheta$), mens systemeksternaliteten øker med egen skadeandel (ϑ). Alle kostnadskomponentene øker (i absolutt verdi) med skaderisikoen (r) og verdsettingen ($a+c$); dog systemeksternaliteten kun med ex-post-kostnaden (c).

Hvis vi vurderer de marginale eksterne personskadekostnadene som påføres andre av et bestemt transportmiddel (transportaktør), X , for skadegrad i , og vi betegner motpartene $\hat{Y}$, og skiller mellom (den vektete) risikoen for skade i motpartulykke, $r_{X\hat{Y}}$, og risikoen for skade i ulykke uten motpart, r_{XO} , så kan vi formulere dette som:

$$\begin{aligned} \text{Marginal ekstern personskadekostnad } X_i = & E_{X\hat{Y}} r_{X\hat{Y}}(a_i+c_i) + E_{XO} r_{XO} c_i \\ & + (1-\vartheta_{X\hat{Y}}) r_{X\hat{Y}}(a_i+c_i) \\ & + \vartheta_{X\hat{Y}} r_{X\hat{Y}} c_i + r_{XO} c_i \end{aligned} \quad [3]$$

Her er:

$E_{X\hat{Y}}$: Vektet risikoelastisitet for skaderisiko, av skadegrad i , tilknyttet transportmiddel X sine kollisjoner med andre trafikanter;

$\vartheta_{X\hat{Y}}$: Vektet skadeandel (av skadegrad i) for transportmiddelet, X_i , i kollisjoner med andre trafikanter

$r_{X\hat{Y}}$: Summert risiko for skade (av skadegrad i) for transportmiddel X og motpart $\hat{Y}$ ¹⁷

i : Skadegrad

X : Transportmiddel

¹⁷ Så $r_{X\hat{Y}}$, som altså inkluderer både X sine skader og evt. motpart $\hat{Y}$ sine skader, beregnes mht. (kun) X sin eksponering. Vi må dele summen av skaderisikoen på to (når vi både tar med X og $\hat{Y}$ sin skade i kollisjonene), for ellers vil vi dobbelt-telle når vi summerer over transportmidler. Samtidig må begge parter skader inngå i risikotermen (en vektet egenrisiko-fremmedrisiko) i det matematiske uttrykket, for at skadefordelingen og eksternalitetsformelen skal få mening.

E og ϑ er vektet mht. risikoen i hver motpartkombinasjon, og det er X sitt trafikkarbeid (kjøretøykm/togkm/fartøykm) som er risikomålet.

$E_{XOI}r_{XOI}C_i$ og $r_{XOI}C_i$ er bidragene fra ulykkene uten motpart.

Den delen av den marginale skadekostnaden som kan regnes som intern (ikke en del av den eksterne kostnaden), er ex-ante-verdsettingen av skaden påført «seg selv» (påført alle de «om bord» i eget transportmiddel), dvs. $\vartheta r a_i$, eller, uttrykt for transportmiddel X for skadegrad i : $\vartheta_{X\vartheta_i} r_{X\vartheta_i} a_i + r_{XOI} a_i$.

Summen av den marginale eksterne og den marginale interne gir den marginale personskadekostnaden: $(1+E)r(a+c)$; eller, tilordnet transportmiddel X for skadegrad i : $(1+E_{X\vartheta_i})r_{X\vartheta_i}(a_i+c_i)+(1+E_{XOI})r_{XOI}C_i$. Vi ser at dette uttrykket blir lik gjennomsnittskostnaden om risikoelastisiteten, E , er lik 0: $r(a+c)$; eller, tilordnet transportmiddel X for skadegrad i : $r_{X\vartheta_i}(a_i+c_i)+r_{XOI}C_i$. Totalkostnaden er lik gjennomsnittskostnaden, $r(a+c)$, multiplisert med trafikkarbeidet (hvis vi opererer med risiko og kostnader per kjøretøykm, dvs. per togkm, og ditto for bruk av transportarbeidet gitt kostnad per personkm eller per tonnkm), som vi kan benevne Q ; altså, for transportmiddel X for skadegrad i : $[r_{X\vartheta_i}(a_i+c_i)+r_{XOI}C_i] \times Q_X$.

4.2.2 Materielle skader i ulykker

Vi vil bruke samme rammeverk og nesten akkurat samme tilnærming til materielle skader som til personskader. Imidlertid har vi ikke offisielle verdsettinger eller offisielle gjennomsnittlige kostnadsestimater som vi kan ta utgangspunkt i, for materielle skader som for personskader. Vi vil etablere kostnadsestimater per materielt skadetilfelle som bygger på aggregerte kostnadsdata, med differensiering mht. motpart.

Vi kan tenke oss at folk verdsetter risikoreduksjon for materielle skader prinsipielt på samme måte som for personskade (og dette er for så vidt reflektert i villigheten til å betale forsikringspremier). Vi kan ikke fastsette noe gjennomsnittsbetrag, a , for ex-ante-verdsetting av materiell skaderisiko-reduksjon. For personskader ligger a betydelig høyere enn c , ex-post-kostnaden. Men, uten videre grunnlag velger vi i våre eksempelberegninger å sette a lik c .

I tillegg mangler vi informasjon om skadefordelingen (ϑ) i dataene over materielle skader i jernbanetransport. Her vil vi bygge på skadefordelingsinformasjon fra personskadene (vektet mht. antall per skadegrad).

For risiko-beregningen, så vil vi også ta utgangspunkt i personskade-risikoen, og så skalere denne mht. antall hendelser per år.

4.3 Data

4.3.1 Personskader i ulykker

4.3.1.1 Personskadedata fra ulike datakilder – SJT og SVV/TRULS

Ulykkesdataene vi benytter vil være basert på statistikk om togulykker fra Statens jernbanetilsyn (SJT) og ulykkesstatistikk som involverer vegtransport, fra TRULS, Statens vegvesen (SVV), som inkluderer motpartulykker mellom tog og vegtransportframkomstmiddel.

Den offisielle statistikken om togulykker fra SJT differensierer arbeidsoperasjoner, involverte personkategorier, ulykkestyper og skadegrader:

- Arbeidsoperasjonene som vi inkluderer, er for det meste tilknyttet *togframføring*, dvs. **kjøring av persontog og kjøring av godstog**. Vi velger også å ta med noe fra andre kategorier som mangler persontog-/godstogs-spesifisering. Én av disse er **arbeidstog/tomtog**. Tomtog-kjøring er (som kjøring med tom buss/lastebil) en indirekte del av transportarbeidet, at transportmiddelet noen ganger må kjøres tomt (tilbake) til påstigningsterminal/lastested. Arbeidstog er også relevant å ta med (akkurat som vegarbeidskjøretøy), så lenge ulykkene skjer under transport til/fra det stedet der arbeidet utføres. For **skifting** er det generelt noe mer komplisert, i og med at det meste av dette skal skje på skiftespor, utenfor det trafikkerte sporet (togtransport-spolet; og da er det nok mest sammenliknbart med f.eks. kjøring av buss/lastebil på selskapets parkeringsplass, eller på laste-/lossested utenfor offentlig veg). Imidlertid har de to største personskadeulykkene under skifting, i dataene fra 2006 til 2023, forvoldt skade fordi togvognen under skifting er brakt ut på det trafikkerte sporet og har kollidert med andre tog eller bygninger og (vegtrafikk)kjøretøy. Disse ulykkene har altså, så langt vi kan anta og/eller lese i havarirapportene, inntruffet med utgangspunkt i det som må være det trafikkerte sporet.¹⁸ Slike motpartulykker på trafikkert spor, som har oppstått pga. feilhandlinger under skifting, vil vi regne som transportulykker. Men vi utelater personskadene under skifting hvis vi kan anta at disse har skjedd på skiftespor (utenom trafikkert spor). Den siste arbeidsoperasjonen under togframføring er **øvrige / annet**, og siden de få spesifikasjonene antyder villedende hendelser, så utelater vi skadene registrert i denne underkategorien.
- SJT-dataene skiller mellom tre grupper: ansatte, passasjerer og «tredjepersoner». Vi regner de ansatte og passasjerene som de skadde om bord på toget (om enn det i noen tilfeller kan være ansatte som oppholder seg utenfor toget mens toget er i bevegelse, og noen av passasjerene kan ha blitt skadet ved av-/påstigning, på perrongen). Tredjepersonene regner vi som skadde motparter, motparter i andre tog, motparter i vegtrafikk-kjøretøy, eller påkjørte fotgjengere.
- Når det gjelder typer ulykker, så vil vi operere med seks spesifiserte (aggregerte) kategorier. To av kategoriene vil vi generelt regne som togulykker uten motpart (eneulykker), dvs. «avsporing» og «av-/påstigning». Vi har kun én tredjeperson inkludert i sistnevnte kategori i SJT-dataene, men vi vil regne denne implisitt som passasjer. Avsporing kan selvsagt ramme tredjepersoner, det vil bl.a. i stor grad avhenge av hvor toget sporer av, men vi har ingen oppgitte skadde tredjepersoner ved avsporinger i dataene fra perioden 2006-2023. Én kategori av ulykkestyper vil i noen grad kunne inkludere motpartulykker, og det er kategorien benevnt som «sammenstøt-diverse»; mange av disse vil omfatte sammenstøt med steiner (f.eks. fra ras) eller andre gjenstander i sporet, men kategorien omfatter også sammenstøt med bygninger og med anleggsmaskiner, og skadde tredjepersoner vil bli plassert i annet-kategorien for (veg)transportmidler. De øvrige tre kategoriene av ulykkestyper er å regne som rene motpartulykkestyper: «personpåkørsel», «motpartulykke m/ vegtrafikk-kjøretøy» og «motpartulykke m/ annet tog» (benevnt som «kjøretøy» i SJT-dataene). For personpåkørsel avgrenser vi tredjepersonene til fotgjengere/gange, mens for øvrige vegtrafikk-motparter, som normalt ikke vil være spesifisert, så fordeler vi mht. de offisielle skadedataene for vegtrafikk-kjøretøy (fra SVV/TRULS). Uten annen informasjon så vil vi fordele skadde i motpartulykker mellom tog mht. trafikkarbeidet; vi oppfatter det slik at dette primært vil omfatte at et tog i bevegelse kjører inn i et stillestående tog. I tillegg er det en sjuende kategori, en «annet»-kategori av tog-ulykkestyper som vi vil regne som ulykke uten motpart.

¹⁸ Den ene store ulykken med flere personskader, oppgitt under arbeidsoperasjon skifting, er Sjursøya-ulykken (i 2010), der godstogvognen ble koblet av på skiftespor på Alnabru, men trillet ut i hovedsporet og ned til Sjursøya (SHT, 2011). Da kan vi tolke det som en transportulykke (slik som kollisjon forårsaket av en løs vogntog-/trailer-tilhenger også ville ha vært, om hendelsen fant sted på/langs offentlig veg), en godstransport-ulykke, selv om dette var noe annet enn ordinær kjøring. Den andre større ulykken oppgitt under skifting, med flere personskader, er en ulykke ved Katterat stasjon (i 2009), der et arbeidstog kjørte inn i et godstog (SHT, 2009).

- SJT-dataene opererer med fem skadegrader for personskader: Død, alvorlig skade, moderat skade, mindre alvorlig skade og førstehjelpsskade. Vi aggregerer de to sistnevnte til «lettere skader», mens alvorlig og moderat skade samles i kategorien «hard skade».

Tabell 4.1 gir en oversikt over skadedataene fra SJT.

Tabell 4.1: Rapporterte dødsfall, harde personskader og lettere personskader i transportulykker med tog, 2006-2023 - Kilde: Statens jernbanetilsyn (SJT).

	Drept			Hardt skadet			Lettere skadet			Sum
	Ansatt	Passasjer	3. person	Ansatt	Passasjer	3. person	Ansatt	Passasjer	3. person	
Av-/påstigning					1		1	6	1	9
Avsporing				2	2		12	42		58
Personpåkørsel		1	30	2	3	8	8	8	16	76
Motpartulykke-tog							17	2	1	20
Motpartulykke-vegekjetøy			0			0	1		2	3
Sammenstøt-diverse	1		3			3	3	10	2	22
Annet							25	8		33
Total	1	1	33	4	6	11	67	76	22	221

Merknad: Skadegraden «hardt skadet» er summen av SJT's «alvorlig skade» og «moderat skade», mens «lettere skadet» er summen av SJTs «liten skade» og «førstehjelp-skade».

SJT-dataene inneholder 221 personskader som vi karakteriserer som skader/dødsfall knyttet til togtransporten (tabell 4.1). Det store flertallet er lettere skader, der de fleste lettere skadde enten er togpassasjerer eller ansatte. Ulykketype-kategoriene er våre egne aggregeringer av SJTs mer detaljerte kategorier. For personpåkørsel, som er kategorien med flest skader, er det en høy andel dødsfall, og nesten alle er tredjepersoner.

For kategorien «Av- og påstigning», i tabell 4.1, har vi kun én tredjeperson, og denne blir behandlet som passasjer i det videre, slik at denne kategorien, sammen med «Avsporing» og «Annet», ikke inkluderer ulykker med motparter (kun eneulykker). Vi vil regne alle tredjepersoner fra kategorien «Personpåkørsel» som fotgjengere; men evt. skadde personer på perrongene er (som for av-/påstigning) klassifisert som passasjerer. For kategorien «Motpartulykke-tog» vil antallet skadde fordeles mht. togtypenes trafikkarbeid; oftest er bare én av tog-partene spesifisert i skadedataene (som muligens kan forklares av at den spesifiserte togtypen kjører inn i et annet tog som står stille). For kategorien «Motpartulykke-vegekjetøy» kan tredjepersonene fordeles på alle vegtransportmiddel utenom gange, og mer spesifikt brukes skadefordelingen mellom vegtrafikk-kjøretoy fra SVV/TRULS. Kategorien «Sammenstøt-diverse» omfatter alt fra det å kjøre inn i steiner og mindre gjenstander på sporet til det å kjøre inn i bygninger, og også anleggsmaskiner, og tredjepersonene kan være vanskelige å plassere i type motpart; vi vil i det videre plassere alle tredjepersoner fra denne kategorien i restgruppen av «annet (veg)transportmiddel».

Det er, som tidligere nevnt, spesifisert i SJT-dataene om ulykken er knyttet til kjøring av persontog eller kjøring av godstog, men en betydelig del av skadene har skjedd med (uspesifisert) «annet tog». Vi antar at det meste av dette omfatter kjøring med arbeidstog og tomkjøring. Vi vil både presentere beregninger med «annet tog» som egen kategori og beregninger der skadene tilknyttet kategorien «annet tog» er fordelt 50-50 mellom godstog og persontog. Vi velger å fordele enkelt 50-50, for til tross for at trafikkarbeidet er betydelig større for persontog enn for godstog, så er noen av de større ulykkene med «annet tog» skifting/arbeid med godstogvognen.

Tabell 4.2 viser oversikten over skadedataene fra SJT fordelt på hhv. godstog, persontog og annet tog.

Tabell 4.2: Rapporterte dødsfall, harde personskader og lettere personskader i transportulykker med godstog, persontog og andre tog, 2006-2023 - Kilde: Statens jernbanetilsyn (SJT).

	Godstog						Persontog						Annet tog						Sum
	Drept		Hardt skadet		Lettere skadet		Drept		Hardt skadet		Lettere skadet		Drept		Hardt skadet		Lettere skadet		
	Pass./ansatt	3.person	Pass./ansatt	3.person	Pass./ansatt	3.person	Pass./ansatt	3.person	Pass./ansatt	3.person	Pass./ansatt	3.person	Pass./ansatt	3.person	Pass./ansatt	3.person	Pass./ansatt	3.person	
Av-/påstigning									1		7	1							9
Avsporing									4		48						6		58
Person-påkørsel		1					1	29	4	7	11	15			1	1	5	1	76
Motpartulykke-tog											8						11	1	20
Motpartulykke- veggkjøretøy												2					1		3
Sammenstøt-diverse											11	1	1	3		3	2	1	22
Annet											17						16		33
Total	0	1	0	0	0	0	1	29	9	7	102	19	1	3	1	4	41	3	221

Merknad: Skadegraden «hardt skadet» er summen av SJT's «alvorlig skade» og «moderat skade», mens «lettere skadet» er summen av SJTs «liten skade» og «førstehjelp-skade».

De aller fleste av de 221 personskadene i SJT-dataene er knyttet til persontog-transport, svært få er knyttet til godstog-transport, og relativt mange er tilknyttet «annet tog» (tabell 4.2).

Den offisielle personskadestatistikk for vegtrafikken (TRULS, Statens vegvesen) differensierer (vegtransport) motparter mer detaljert, men mangler differensiering mht. ulykkestype (og mangler informasjon om lokalisering):

- TRULS-dataene inneholder skadde personer i motpart-ulykker med tog, skadde vegtrafikanter og skadde personer på toget. (I tillegg er det inkludert skadde i ulykker uten motpart, for vegtrafikk-kjøretøy.)
- Det opereres med tre person-skadegrader: drepte, hardt skadde og lettere skadde (og hvis skadegraden ikke er spesifisert så behandler vi disse som lettere skadde).
- TRULS-dataene inkluderer ikke differensiering av togtype, persontog vs. godstog, ei heller ulykkestype eller geografisk lokalisering.

Tabell 4.3 gir en oversikt over skadedataene fra SVV/TRULS.

Tabell 4.3: Rapporterte dødsfall, harde personskader og lettere personskader i transportulykker med tog, 2006-2023 - Kilde: Statens vegvesen (TRULS).

	Drept	Hardt skadet	Lettere skadet	Sum
Gange		1	1	2
Sykkel	1	1		2
Moped		1		1
Lett MC	1			1
Tung MC		1		1
Personbil	3	5	15	23
Buss	1		1	2
Varebil	1		2	3
Lastebil	2		2	4
Annet (veg)transportmiddel	1		1	2
Sum vegtransport u/gange	10	8	21	39
Tog			9	9
Total	10	9	31	50

Merknad: Alle de skadde i veg-framkomstmiddel forutsettes å være skadde fra togets motpart. Videre antar vi at de skadde på toget er passasjerer/ansatte som er blitt skadet i kollisjonene med veg-framkomstmiddel (utenom kollisjoner med gående).

TRULS-dataene inneholder 50 personskader som er knyttet til togtransporten (tabell 4.3). Vi har skilt mellom gange og andre veg-framkomstmiddel, for vi vil knytte de førstnevnte til SJTs personpåkørsel-kategori og de øvrige skadde til SJTs motpart-vegkjøretøy. De skadde på togene i motpart-ulykker med veg-kjøretøy, er passasjerer/ansatte som vi fordeler mellom togtyper og mellom veg-kjøretøy-motparter etter rammer foreslått i Rødseth et al. (2020); og dette vil bli spesifisert nedenfor. Det er relativt mange drepte og hardt skadde, relativt til lettere skadde, i dataene fra SVV/TRULS.

4.3.1.2 Kombinering av personskadedataen fra SJT og SVV/TRULS

Kombinasjonen av SJT-data og TRULS-data er utfordrende, for vi kan ikke matche disse én-til-én. Men vi vil, som nevnt, bruke forenklinger slik at vi kan **matche mht. kategorier**. Dette vil, for det første, være basert på antakelsen at «påkørte» tredjepersoner i SJT-dataene er samme del-gruppe som skadde gående fra motpart-ulykker med tog i SVV/TRULS-dataene. Andre skadde vegtrafikanter fra motpart-ulykker med tog i SVV/TRULS-dataene, fra spesifiserte kjøretøy, er samme del-gruppe som tredjepersonene i «motpartulykke-vegkjøretøy» i SJT-dataene. Og, ditto, de skadde om bord på togene, i SVV/TRULS-dataene, er skadde passasjerer/ansatte i «motpart-vegtransport-kjøretøy» i SJT-dataene. I tillegg er det et visst antall skadde tredjepersoner tilknyttet spesielt «annet tog», i SJT-dataene, og vi antar at alle disse ville inngå i kategorien «andre (vegtransport)kjøretøy» i SVV/TRULS-dataene.

I SJT-dataene er det også motpart-ulykker *mellom tog*, «motpartulykke-tog», der vi antar at disse *ikke* har noen parallell del-gruppe i SVV/TRULS-dataene.

For de øvrige kategoriene i SJT-dataene, «av- og påstigning», «avsporing», «annet», regner vi at disse kun er «ulykker uten motpart», ulykker som kun rammer togpassasjerer og togansatte (unike SJT-data mht. personskader). Den ene registrerte tredjepersonen under kategorien «av- og påstigning» blir de facto regnet som passasjer. Og det er nok også slik at grensen der en person går fra å være fotgjenger/tredjeperson til passasjer kan være flytende, f.eks. at noen av de som står på perrongen klar til å gå om bord kan bli betegnet både som passasjer (som er definisjonen som vi følger i vår analyse) og som tredjeperson (men det kunne f.eks. tenkes at denne ene tredjepersonen i SJT-dataene, under av- og påstigning, var en person som kun fulgte en annen person om bord på toget).

Uansett forenkler det sammenstillingen av SJT-dataene og SVV/TRULS-dataene at vi knytter SJT-kategorier til SVV/TRULS-delgrupper helt entydig, noe vi også finner rimelig godt grunnlag for. Og alle øvrige SJT-kategorier inkluderer kun togulykker uten motpart, og er helt uten overlapp med SVV/TRULS-dataene.

Tabell 4.4: Rapporterte dødsfall, harde personskader og lettere personskader i transportulykker med tog, 2006-2023 - Kombinasjon av SVV/TRULS og SJT.

X	Y = Tog			Y = «Ikke-tog»			Uten motpart (tog)			Sum
	Drept	Hardt skadet	Lettere skadet	Drept	Hardt skadet	Lettere skadet	Drept	Hardt skadet	Lettere skadet	
Gange	30	8	16							54
Sykkel	1	1								2
Moped		1								1
Lett MC	1									1
Tung MC		1								1
Personbil	3	5	15							23
Buss	1		1							2
Varebil	1		2							3
Lastebil	2		2							4
Annet (veg)-transport-middel	3	3	2							8
Sum vegtransport	42	19	38							99
Tog			20	1	5	25	1	5	108	165
Total	42	19	58	1	5	25	1	5	108	264

Merknad: X i radene betyr at skadetallene er skadene i transportmiddel X (i kollisjon med Y eller evt. uten motpart). Tallene i rosa fargede celler er basert på SJT – det høyeste antallet er gitt fra SJT-dataene; mens for ikke-rosa input-celler, så er disse fra SVV/TRULS. I den venstre kolonnen (motpart Y = Tog) er opplistet tredjepersoner (fotgjengere) påkjørt av tog (Gange), samt tredjepersoner i ikke-spesifiserte veg-transportmiddel (Annet); og i tillegg 20 lettere skadet om bord på tog i motpart-ulykke med tog. I midterste kolonnen (Y = Ikke-tog) er skadde tog-passasjerer og tog-ansatte ved påkjørselulykker, ved kollisjoner med andre vegtransportmiddel (fordelt/vektet mht. SVV/TRULS-data), og ved kollisjoner med andre tog. I kolonnen til høyre (Uten motpart) er opplistet skadde tog-passasjerer og tog-ansatte i togulykker uten motpart. Angående skadde togpassasjerer/-ansatte i motpartulykke med gående (person-påkjørsel) eller med andre vegtransportmidler, så er den drepte og de fem hardt skadde tilknyttet personpåkørsel-ulykker, pluss 16 av de lettere skadde; de ni øvrige lettere skadde togpassasjerer/-ansatte er fra motpartulykker med vegkjøretøy.

Med den forenklerende tilknytningen mellom SJT-data og SVV/TRULS-data på plass, så vil vi **anta at felles del-grupper i begge datasett rommer de samme ulykkene** og de samme skadde/drepte personene. Dvs., ett av datasettene kan inneholde flere rapporterte skader, men datasettet med færrest skader omfatter skader som også er rapportert i datasettet med flest skader, i samme matchende del-gruppe. Videre ser vi bort fra at ulike skadegradssystemer kan forventes å gi inkonsistens i grupperingen av «harde skader» og «lettere skader». Da blir vår siste datakombinasjonsregel å **velge det høyeste skade-antallet** (i stedet for summen) **for hver overlappende del-gruppe**, i SJT- og SVV/TRULS-dataene.

Tabell 4.4 viser at 54 gående er blitt påkjørt og skadet/drept av tog, i 18-års-perioden fra 2006 til 2023. 45 personer i andre vegtransportmidler er skadet/drept i kollisjon med tog, i samme periode (37 i spesifiserte transportmiddel, åtte i ikke-spesifiserte vegtransportmiddel). 31 tog-passasjerer/tog-ansatte er skadet/drept i kollisjoner med veg-trafikanter (inkludert gående); mens 20 tog-passasjerer/tog-ansatte er blitt lettere skadd i kollisjoner mellom tog. I tillegg er 114 tog-passasjerer/tog-ansatte skadd/drept i tog-ulykker uten motpart, de aller fleste kun «lettere skadd» (liten skade eller førstehjelp-skade).

Tabell 4.4 er resultatet av kombinasjonen av SJT-data og SVV/TRULS-data. Dette resultatet vises mht. ulykkeskategorier i tabell 4.5.

Tabell 4.5: Rapporterte dødsfall, harde personskader og lettere personskader i ulike transportulykkestyper med tog, 2006-2023 - Kombinasjon av SJT og SVV/TRULS.

X = Tog	Y = Tog			Y = Gange			Y=P.bil	Y=Buss	Y=V.bil	Y=L.bil	Uten motpart (tog)			Sum
	Drept	Hardt skadet	Lettere skadet	Drept	Hardt skadet	Lettere skadet	LS	LS	LS	LS	Drept	Hardt skadet	Lettere skadet	
Av- og påstigning												1	8	9
Avsporing												4	54	58
Personpåkørsel				1	5	16								22
Motpartulykke-tog			20											20
Motpartulykke-vegkjøretøy							8,0	0,1	0,1	1,0				9
Sammenstøt-diverse											1		13	14
Annet													33	33
Sum tog			20	1	5	16			9		1	5	108	165
X = «Ikke-tog»														
Personpåkørsel	30	8	16											54
Motpartulykke-vegkjøretøy	9	8	20											37
Sammenstøt-diverse	3	3	2											8
Total	42	19	58	1	5	16			9		1	5	108	264

Merknad: P.bil er personbil, V.bil er varebil og L.bil. er lastebil. LS er «lettere skadet». De 30 drepte, 8 hardt skadde og 16 lettere skadde, i nedre venstre kolonne, har vi tolket (fra SJT-dataene) å være gående påkjørt av toget. De 37 lettere skadde i motpartulykke-vegkjøretøy er førere/passasjerer i ulike vegkjøretøy. Og alle de åtte i sammenstøt-diverse samler vi i kategorien ikke-spesifiserte «andre vegkjøretøy» (f.eks. traktor eller anleggskjøretøy). Tallene i de lyseblå-fargede cellene er basert på SVV/TRULS-data; mens for ikke-lyseblå input-celler, så er disse fra SJT.

Den største kategorien mht. antallet skadde/drepte er **personpåkjørslar**, med 54 skadde/drepte gående og 22 skadde/drepte togpassasjerer/togansatte. 58 togpassasjerer/togansatte ble skadet (ingen drept) i **avsporinger**. Det var 37 andre spesifiserte vegtrafikanter (utenom gange) som ble skadet/drept i kollisjon med tog, altså **motpartulykke-vegkjøretøy** (tabell 4.5).

264 skadde/drepte over en 18-års-periode gir snaut 15 skadde/drepte per år. Gitt at vi skal legge inn en viss risikoreduksjon over tid (Rødseth et al., 2020, kap. 7), så setter vi «gjennomsnittsårstallet» for vårt datagrunnlag til 2015.

4.3.1.3 Verdsetting av personskade av ulik skadegrad

Følgende tall viser de verdsettingene av personskade som brukes i våre beregninger.

Tabell 4.6: Personskadeverdsetting - komponenter for beregning av marginale eksterne kostnader (2025-kr)

	Dødsfall	Hard skade	Lettere skade
VSL/VSS, ex-ante verdsetting av risikoendring (a)	47 700 000	9 336 723	835 049
Ex-post-kostnader – samfunnet (c)	6 670 000	4 365 312	94 039
Totalt kostnad per drept/skadd (a+c)	54 370 000	13 702 035	929 087

Merknad: Verdsettingen i 2025-priser er estimert ved BNP-nominell oppdatering av VSL fra 2012, 30.mill. kr (NOU, 2012; Finansdepartementet, 2017; 2024), og med samme verdiforhold for andre ex-ante-risikoendringsverdsettinger (Veisten et al., 2010). Ex-post-kostnadene er KPI-justert (en vektet KPI som bl.a. inneholder KPI for helsetjenester), med utgangspunkt i Elvik (2019), Veisten et al. (2010) og Statens vegvesen (2014, 2021). Vi antar at banesektorens «alvorlig skade» og «moderat skade» dekker omtrent samme skadegrad som «hard skade» i vegsektoren, samt at banesektorens «liten skade» og «førstehjelpsskade» dekker omtrent samme skadegrad som «lettere skade» i vegsektoren.

Som nevnt inngår ex-ante verdsettingen av skaderisikoendring, a , i fysisk eksternalitet (skadeandelen for motpart) og i den interne (ikke-eksterne) delen (skadeandelen for eget transportmiddel, personer i eget transportmiddel). Ex-post-kostnaden, c , inngår i både den fysiske eksternaliteten og i system-eksternaliteten (hhv. ex-post-kostnad for motpart og for egen del).

4.3.1.4 Eksponering

Følgende tabell viser det trafikk- og transportarbeidet som legges til grunn i beregningene.

Tabell 4.7: Estimerte millioner kjøretøykm (togkm), personkm og tonnkm, for 2015 og 2025.

Tog-kategori	2015 (gj.snitt av 2006-2023)			2025 (framskrevet)		
	Kj.t.km	Pers.km	Tonnkm	Kj.t.km	Pers.km	Tonnkm
Godstog	8,6		2647	8,5		2804
Persontog	37,4	3062		40,7	3118	
Annet tog	2,8	4,2		3,3	4,9	
Godstog (inkl. 50% «Annet tog»)	10,1		2647	10,1		2804
Persontog (inkl. 50% «Annet tog»)	38,8	3064		42,3	3120	
Totalt	48,8	3079		52,5	3135	

Merknad: Dataene er basert på opplysninger fra SSB, Statens jernbanetilsyn og Jernbanedirektoratet. Kategorien «Annet tog» kan omfatte både tomkjøring og annet som kan ligge i grenseland mellom transport (tog i trafikkert spor) og arbeid/skifte utenfor transport; vi har valgt å fordele denne kategorien 50-50 mellom godstogtransport og persontogtransport. Det er antatt en trafikk-/transportvekst i jernbanesektoren på 0,8% i årene fra 2023 (siste data-år) til 2025 (Hovi et al., 2017; Madslien et al., 2017); pandemien i 2020-2022 kan i begrenset grad påvirke trafikk-/transportarbeidsestimatet for 2025.

Det er gitt at eksponeringsestimatene vil ha stor effekt på skaderisiko-estimeringen (r).

4.3.1.5 Sum personskaderisiko

Følgende tabell viser den samlede personskaderisikoen for hver togtype/togulykketype, risikoen for å skade noen om bord pluss evt. motpart-personer ($r_{X\hat{Y}_i}$).

Tabell 4.8: Sum risiko per mill. kjøretøykm for personskade, i eget transportmiddel (X) og i evt. motpart (Y), estimerer for 2025.

Tog-kategori/ulykkestype	Drepte	Hardt skadde	Lettere skadde
Godstog	0,0061	0,0054	0,0296
Persontog	0,0185	0,0153	0,1672
Annet tog	0,0373	0,0335	0,6042
Godstog (inkl. 50% «Annet tog»)	0,0105	0,0093	0,1083
Persontog (inkl. 50% «Annet tog»)	0,0192	0,0159	0,1824
Av-/påstigning		0,0010	0,0088
Avsporing		0,0039	0,0596
Person-påkjørsel	0,0120	0,0053	0,0145
Motpartulykke-tog			0,0136
Motpartulykke-vegkjøretøy	0,0035	0,0033	0,0132
Sammenstøt-diverse	0,0019	0,0012	0,0152
Annet			0,0364

Merknad: Det er antatt personskade-risikoreduksjon over tid (Elvik 2019), slik at risikonivået i 2025 er ca. 68% av nivået i 2015. Risikoen (også for motpartskade) er her beregnet mht. den gitte togtypens kjøretøykm.

Som det framgår av tabellen så finnes en betydelig andel av skadene i jernbanetransporten i tilknytning til «annet tog». Når vi fordeler denne risikoen på godstog og persontog, så blir særlig risiko-estimatene for førstnevnte påvirket (presset opp).

4.3.1.6 Skadefordelingsestimerer – personskaderisiko

Følgende tabell viser skadefordelingsestimatene for ulike togtyper/ulykkestyper.

Tabell 4.9: Vektet skadefordeling, ϑ – den risiko-vektede andelen av skaden som tilfaller toget i motpart-ulykker (skadde passasjerer/ansatte relativt til skadde i motpart-transportmiddel).

Tog-kategori/ulykkestype	Drepte	Hardt skadde	Lettere skadde
Godstog	3,4 %	26,9 %	30,8 %
Persontog	4,5 %	39,6 %	49,6 %
Annet tog	5,0 %	19,5 %	37,0 %
Godstog (inkl. 50% «Annet tog»)	3,1 %	20,6 %	26,0 %
Persontog (inkl. 50% «Annet tog»)	4,6 %	37,8 %	49,8 %
Av-/påstigning			
Avsporing			
Person-påkjørsel	3,2 %	38,1 %	50,0 %
Motpartulykke-tog			50,0 %
Motpartulykke-vegkjøretøy	5,4 %	28,4 %	33,3 %
Sammenstøt-diverse	5,0 %	10,0 %	20,0 %
Annet			

Merknad: Det følger av definisjonen av ϑ at den i kollisjoner mellom like motparter er 50%, og at den er 100% i ulykker uten motpart.

Det er gjennomgående en lavere andel skadde på toget, relativt til skadde motparter, jo høyere skadegrad, med noen få unntak. Tallgrunnlaget vil være spedt for noen av de spesifiserte kategoriene, som gir mer usikre skadefordelingsanslag.

4.3.1.7 Hovedestimering av marginale eksterne kostnader for personskade i ulykker, for godstog og persontog, samt for ulike togulykkestyper

Vi vil her fokusere på estimering av marginale eksterne kostnader av personskade ved ulykker for godstog og persontog. Slik sett vil altså alle skadetallene, skadde om bord på den spesifikke togtypen og skadde motparter, inngå i det risikoestimatet vi bruker i beregningene ($r_{X\vartheta_i}$). De eksterne (og interne) kostnadene vil variere mht. motparten, og vi vil beregne disaggregert og summere (ikke beregne basert på totalanslag og vektete gjennomsnitt). En mer detaljert framstilling av stegene i estimeringen av

marginale eksterne kostnader, for personskader i ulykker som involverer godstog og persontog, er vist av Veisten et al. (2025a).

Vi vil i resultatkapitlet, i tillegg, også ta med en enkel oversiktstabell for tog sammen med andre transportmiddel, basert på data fra perioden 2006-2017 (som vil likne mer på framstillingen i Rødseth et al., 2020, kap. 7). Til forskjell fra Rødseth et al., så vil vi estimere med korrigering for underrapportering, som «default». Denne endringen bygger i stor grad på en rapport fra Lund (2019) med nye estimater for underrapportering i vegtransporten, dvs. private transportmidler; underrapporteringen er dokumentert å være såpass omfattende at det å se bort fra dette kan forventes å gi betydelig større feil enn å bruke underrapporteringskorrigerede estimater (Veisten et al., 2025a). For tog legger vi til grunn en relativt høy rapporteringsgrad: For harde skader 95% i motpartulykker og 80% i eneulykker, og for lettere skader 85% i motpartulykker og 70% i eneulykker.

4.3.2 Materielle skader i ulykker

4.3.2.1 Materielle skadekostnadsdata tilknyttet ulykker fra Vy

Vi mottok en opplisting av 26 **materielle skader**, med beskrivelser og kostnader, for Vy-persontog i transport i Norge, i de fire årene fra midten av 2020 til midten av 2024. Vi velger å klassifisere disse rapporterte skadene på samme måte som for personskader, relativt konsistent med Statens jernbanetilsyn (SJT), som vist i Tabell 4.10.

Tabell 4.10: Rapporterte materielle skader tilknyttet togulykker fra Vy, i fireårsperioden fra medio 2020 til medio 2025.

Ulykkestype	Antall registrerte hendelser	Skadebeløp registrert totalt	Skadebeløp per registrert hendelse	Skadebeløp registrert per år
Av- og påstigning				
Avsporing				
Personpåkørsel				
Motpartulykke-tog	3	10 757 381	3 585 794	2 689 345
Motpartulykke-vegekjøretøy	5	84 138 700	16 827 740	21 034 675
Sammenstøt-diverse	13	78 786 063	6 060 466	19 696 516
Annet	5	29 029 046	5 805 809	7 257 262
Totalt	26	202 711 190	7 796 584	50 677 798

Merknad: Skadebeløpene er det maksimale av det «rapporterte», «reserve» og «utbetalte», for hver hendelse.

Halvparten av skadene havner under «Sammenstøt-diverse», som omfatter sammenstøt med fysiske gjenstander (steiner og annet i sporet), pluss et par kollisjoner med traktorer.¹⁹ Videre er det fem hendelser som vi forstår som kollisjoner/kontakt mellom tog, og tre hendelser med kollisjoner med spesifiserte vegkjøretøy (to biler og en lastebil). Kategorien «Annet» omfatter fem materielle skader som skyldes ising eller brann (Tabell 4.10).

Med utgangspunkt i dataene fra Vy i Tabell 4.10, vil vi legge til grunn et premiss om at dette er et representativt utsnitt for all togtransport i Norge, slik at vi kan multiplisere opp tallene til et nivå som er gjeldende for landet som helhet. Det vi bruker er for det første et estimat av Vys andel av trafikkarbeidet i persontog-transporten, som vi estimerer til ca. 45%; og deretter legger vi til godstog-andelen, som

¹⁹ Vi har heller ikke i annen rapportering klassifisert traktor som egen, spesifisert transportmiddel-gruppe (Veisten et al., 2025a; 2025b; Veisten, 2025). Det kan muligens være grunn til å vurdere spesifisering av traktor, i nyere undersøkelser, hvis traktor kan forventes å være spesifisert i data over materielle skader i transport; som for personskader i transport, i SJT og SVV/TRULS (Veisten et al., 2025a).

vi estimerer til ca. en femtedel av det samlede togtrafikkarbeidet (følgelig med ca. fire femdelers tilordnet persontog-andelen).

4.3.2.2 Estimerte totale materielle skadekostnader tilknyttet ulykker i norsk togtransport

Følgende tabell viser vårt estimerte totale materielle skadeomfang i norsk jernbanetransport, basert på tallene fra Vy. Som nevnt er først persontog-delen estimert med oppblåsningsfaktor 1/0,45. Her har vi også lagt inn en antakelse om at et fåtall hendelser med materielle skader også vil tilhøre de tre øverste kategoriene av ulykkestyper, men at både av-/påstigning (passasjerer/ansatte) og personpåkjørsel (gående) vil gi svært lave materielle kostnader. Deretter er det lagt til en godstogandel som er antatt å utgjøre 20% av det samlede tog-trafikkarbeidet (Tabell 4.11).

Tabell 4.11: Estimerte materielle skader tilknyttet tog-ulykker (jernbane-ulykker) i Norge, i fireårsperioden fra medio 2020 til medio 2025 – oppblåsing av dataene fra Vy.

Ulykkestype	Antall hendelser	Skadebeløp totalt	Skadebeløp per hendelse	Skadebeløp per år
Av- og påstigning	1,3	6 500	5 000	1 625
Avsporing	0,6	2 400 000	4 000 000	600 000
Personpåkjørsel	1,3	6 500	5 000	1 625
Motpartulykke-tog	8,3	29 762 087	3 585 794	7 440 522
Motpartulykke-vegkjøretøy	13,9	233 905 586	16 827 740	58 476 397
Sammenstøt-diverse	36,0	218 176 790	6 060 466	54 544 197
Annet	13,9	80 700 748	5 805 809	20 175 187
Totalt	75,3	564 958 211	7 502 765	141 239 553

Merknad: Estimaten er utledet fra en oppskalering til all persontog-trafikk med faktoren 1/0,45, samt tillegg av et fåtall hendelser (0,5 avsporinger og 1 hver av av-/påstigning og personpåkjørsel, i fireårsperioden); og deretter en oppskalering til all togtrafikk, inkludert godstog-trafikk, ved å bruke 20% godstogandel i trafikkarbeidet.

Vi estimerer altså, med utgangspunkt i Vy sine data, at det er ca. 75 hendelser over fireårs-perioden, eller snaut 20 hendelser per år. Det årlige estimerte totalbeløpet for materielle skader er på ca. 140 millioner kroner. Det er da allerede lagt inn et lite tillegg, i de tre øverste kategoriene, som kan bygge på en antakelse om en viss underrapportering. Dvs., vi kan anta at det i de registrerte hendelsene er høyest rapporteringsgrad for de alvorligste hendelsene, hendelsene med de høyeste kostnadene. Tallgrunnlaget i tabell 4.11 vil implisere en risiko for materiell skadehendelse som bare ligger litt i overkant av risikoen for hendelse med personskaide i jernbanetransporten. Skadebeløpet per hendelse må vurderes som relativt høyt, ca. 7,5 mill. kr.

Vi vil, med utgangspunkt i Tabell 4.11, og mindre justeringer/kalibreringer, knytte risikoen for materielle skader til risikoen for personskaide. Vi antar da at det er relativt flere skadehendelser med av-/påstigninger og personpåkjørsler, til lave/ubetydelige materielle skadekostnader (oppblåsing med 1/0,25) og et fåtall flere skadetilfeller tilknyttet de øvrige kategoriene (1/0,8). Dette gir ca. 25 hendelser per år, og en noe lavere gjennomsnittskostnad per hendelse (tabell 4.12).

Tabell 4.12: Estimerte materielle skader tilknyttet tog-ulykker (jernbane-ulykker) i Norge, årlig.

Ulykkestype	Antall hendelser per år	Skadebeløp per hendelse
Av- og påstigning	1,3	5 000
Avsporing	0,2	4 000 000
Personpåkjørsel	1,3	5 000
Motpartulykke-tog	2,6	3 585 794
Motpartulykke-vegkjøretøy	4,3	16 827 740
Sammenstøt-diverse	11,3	6 060 466
Annet	4,3	5 805 809
Totalt	25,3	6 973 424

Merknad: Estimaten er utledet fra en oppskalering av antall hendelser, i tabell 4.11, med 1/0,8; av-/påstigning og personpåkjørsel med 1/0,25.

Estimatene per år, i **Feil! Fant ikke referanse kilden.**, er det vi har generalisert ut ifra datagrunnlaget fra Vy. Vi har basert oss på samme ulykkestype-inndeling for materiell skade som for personskade, med en (implisitt) risiko for materiell skade som er ca. det dobbelte av risikoen for personskade. Når vi estimerer marginale kostnader for materielle skader tilknyttet godstog og persontog vil vi altså multiplisere personskade-risikoen med 2 for å estimere risikoen for materiell skade. Basert på de materielle skade-kostnadsrammene fra Vy har vi satt inn verdsettinger (kostnadsanslag) for motpartulykker og ulykker uten motpart. Vi kjenner ikke gjennomsnittskostnadene for f.eks. materielle skader i kollisjon mellom tog og personbil, men vi har brukt kostnadsanslag som med risikoestimatene vil summere seg til et totalbeløp som nærmer seg de totalanslagene vi har basert på dataene fra Vy, dvs. opp mot 150 mill. kr. Skadebeløpet per hendelse forblir relativt høyt (tabell 4.12).

4.3.2.3 Verdsetting av materielle skader

Verdsettingen av materielle skader, eller kostnadsbeløpet per hendelse, $a+c$, vil variere med ulykkestype (tabell 4.12). Det vil også variere mht. spesifikke motparter under f.eks. «motpartulykke-vegkjøretøy», der skadekostnadene må antas å ligge høyere i gjennomsnitt for kollisjoner med tyngre kjøretøy enn med lettere kjøretøy. Vi kjenner ikke gjennomsnittskostnadene for motpartkombinasjonene, men vi legger inn anslag som gir en totalsum per år opp mot 150 mill. kr (Veisten, 2025). For en gjennomsnittskostnad lik 7 mill. kr og 50-50-fordeling mellom ex-ante-verdsetting av risikoreduksjon og ex-post-kostnad, har vi at $a=3,5$ mill. kr og $c=3,5$ mill. kr. Vi understreker at dette er usikre anslag. Fordelingen mellom a og c vil påvirke fordelingen mellom eksterne og interne kostnader (den sistnevnte relativt lavere jo lavere andel a) og mellom fysisk eksternalitet og systemeksternalitet (den sistnevnte relativt høyere jo høyere andel c).

4.3.2.4 Sum risiko for materielle skader

Følgende tabell viser den samlede materielle skaderisikoen for hver togtype/togulykkestype, risikoen for å skade eget transportmiddel pluss evt. motpart-transportmiddel (r_{XY}).

Tabell 4.13: Sum risiko per mill. kjøretøykm for materiellskade, på eget transportmiddel (X) og evt. motpart (Y), estimerer for 2025.

Tog-kategori/ulykkestype	Materiell skade, risiko
Godstog	0,0821
Persontog	0,4020
Annet tog	1,3499
Godstog (inkl. 50% «Annet tog»)	0,2563
Persontog (inkl. 50% «Annet tog»)	0,4349
Av-/påstigning	0,0180
Avsporing	0,0024
Person-påkjørsel	0,0089
Motpartulykke-tog	0,0273
Motpartulykke-vegkjøretøy	0,0299
Sammenstøt-diverse	0,1334
Annet	0,0591

Merknad: Risikoen (også for motpartskade) er her beregnet mht. den gitte togtypens kjøretøykm.

I Tabell 4.13 er risikoen for ulykkestypene utledet fra den estimerte årlige hendelsesfrekvensen (**Feil! Fant ikke referanse kilden.**). For togtyper, godstog og persontog (og annet tog) har vi brukt en enkel skaleringsfaktor lik 2 mht. personskaderisikoen. Da er f.eks. 0,0821 materielle skader per mill. kjøretøykm med godstog lik personskaderisikoen med godstog (summen av risikoen for dødsfall og/eller hard/lettere skade) multiplisert med 2. Siden vi knytter risikoen for materiell skade til risikoen for personskade (multiplisert med 2), vil også materiell skade ha høyere estimert risiko for kjøring med

«annet tog», sammenliknet med godstog og persontog (Tabell 4.13). Vi har brukt en skaleringsfaktor (av personskafe-risikoen) lik 2, for det gir aggregerte kostnader som er i størrelsesorden opp mot det vi har basert på Vy-data. Men vi kjenner ikke den eksakte fordelingen av materielle skader mellom togtyper; og denne risikoen kan fordele seg på en annen måte for materielle skader enn for personskafer. For ulykkestypene (der alle togtyper kan inngå) vil risikofordelingen være justert mht. det faktiske Vy-datagrunnlaget med oppblåsing (tabell 4.12), slik at risikoen for materiell skade tilknyttet de fire ulykkes-kategoriene i bunnen av tabellen er høyest, særlig for «sammenstøt-diverse» (tabell 4.13).

4.3.2.5 Skadefordelingsestimater – materielle skader

Også estimering av skadefordelingen er utfordrende, da vi mangler input om materielle skadekostnadsfordelinger mellom det involverte toget og motparten. Som en forenkling estimerer vi skadefordelingen basert på skjønnsmessige anslag på kostnader per hendelse for ulike involverte transportmiddel. Følgende tabell viser den estimerte risiko-vektede skadefordelingen for toget (den materielle skaden, skadekostnaden, som tilfaller toget).

Tabell 4.14: Vektet skadefordeling, ϑ – den risiko-vektede andelen av den materielle skaden som tilfaller toget (relativt til materiell skade i evt. motpart-transportmiddel).

Tog-kategori/ulykkestype	Materiell skade, andel skade(kostnad) for toget (m/motpart)
Godstog	78 %
Persontog	79 %
Annet tog	67 %
Godstog (inkl. 50% «Annet tog»)	74 %
Persontog (inkl. 50% «Annet tog»)	79 %
Av-/påstigning	
Avsporing	
Person-påkørsel	87 %
Motpartulykke-tog	50 %
Motpartulykke-vegkjøretøy	85 %
Sammenstøt-diverse	84 %
Annet	

Merknad: Det følger av definisjonen av ϑ at den i kollisjoner mellom like motparter er 50%, og at den er 100% i ulykker uten motpart.

Det er gjennomgående en høy andel materiell skade(kostnad) for toget (tabell 4.14). Dette kan nok i stor grad underbygges med dataene fra Vy – det er et større monetært skadepotensial for tog enn for vegtransport-motparter. Biler kan bli totalskadd, men skadekostnaden vil begrenses oppover av hvor mye en bil koster, og ditto for andre vegkjøretøy. Det kan forventes liten (eller ingen) materiell skade på tog ved person-påkørsel, men de påkjørte vil også ha lave materielle skadekostnader (ødelagte klær, etc.). Uansett er grunnlaget for våre estimerte skadefordelinger ved materielle skader relativt tynt.

4.3.2.6 Eksponering

Vi bruker selvsagt akkurat de samme eksponeringstallene (trafikkarbeid og transportarbeid) for materielle skader som for personskafer (tabell 4.7).

4.3.2.7 Hovedestimering av marginale eksterne kostnader av materielle skader i ulykker, for godstog og persontog, samt for ulike togulykke-typer

Vi vil her fokusere på estimering av marginale eksterne kostnader av materielle skader ved ulykker for godstog og persontog. En mer detaljert framstilling av stegene i estimeringen av marginale eksterne kostnader, for materielle skader i ulykker som involverer godstog og persontog, er vist av Veisten (2025).

Vi vil i resultatkapitlet, i tillegg, også ta med en enkel oversiktstabell for tog sammen med andre transportmiddel, basert på data fra perioden 2006-2017.

4.4 Resultater

4.4.1 Personskader i ulykker

4.4.1.1 Hovedestimering – marginale eksterne kostnader av personskader i togulykker

Følgende tabeller viser de estimerte marginale eksterne kostnadene av personskader i jernbaneulykker, for de ulike togtypene og ulykkestypene.

Tabell 4.15: Estimerte marginale eksterne kostnader av personskader i togulykker, for året 2025 (i 2025-kr).

Tog-kategori/ulykkestype	Marginale eksterne kostnader av personskader v/ jernbanetransportulykker (alle skadegrader)		
	Kroner per kjøretøykm (togkm)	Kroner per personkm	Kroner per tonnkm
Godstog	0,40		0,001
Persontog	1,12	0,014	
Annet tog	1,87	1,25	
Godstog (inkl. 50% «Annet tog»)	0,62		0,002
Persontog (inkl. 50% «Annet tog»)	1,14	0,014	
Av-/påstigning	0,005	0,0001	
Avsporing	0,02	0,0004	
Person-påkjørsel	0,69	0,011	
Motpartulykke-tog	0,007	0,0001	
Motpartulykke-vegkjøretøy	0,22	0,004	
Sammenstøt-diverse	0,08	0,001	
Annet	0,003	0,0001	

Tabell 4.16: Estimerte marginale eksterne kostnadsdelar samt interne kostnader av personskader i togulykker, per kjøretøykm, for året 2025 (i 2025-kr).

Tog-kategori/ulykkestype	Kroner per kjøretøykilometer - personskader ved jernbaneulykker (alle skadegrader)		
	Systemeksternalitet	Fysisk eksternalitet	Intern (fysisk internalitet)
Godstog	0,01	0,39	0,59
Persontog	0,06	1,05	8,41
Annet tog	0,17	1,69	28,9
Godstog (inkl. 50% «Annet tog»)	0,03	0,59	4,34
Persontog (inkl. 50% «Annet tog»)	0,07	1,08	9,18
Av-/påstigning	0,005	0,000	0,532
Avsporing	0,02	0,00	3,45
Person-påkjørsel	0,01	0,68	0,53
Motpartulykke-tog	0,001	0,006	0,370
Motpartulykke-vegkjøretøy	0,01	0,22	0,30
Sammenstøt-diverse	0,01	0,08	0,84
Annet	0,003	0,000	1,979

Persontog har litt høyere marginale eksterne kostnader for personskader i ulykker, per kjøretøykm, enn godstog. Det kan uten videre knyttes til høyere antall passasjerer/ansatte per kjøretøy. «Annet tog» har de klart høyeste marginale eksterne kostnadene. Mht. ulykkestypene er det klart høyest estimert

ekstern marginal kostnad for person-påkjørsel, og deretter motpartulykke-vegkjøretøy og sammenstøt-diverse (tabell 4.15).

Den fysiske eksternaliteten dominerer systemeksternaliteten. Dette henger både sammen med relativt høy ex-ante verdsetting av personskaderisiko (α), samt det at motparten til tog ofte har relativt høy andel av skadefordelingen (1- ϑ). Den interne marginale kostnaden av personskade i togtransporten ligger til dels betydelig over den eksterne kostnaden (

tabell 4.16).

4.4.1.2 Tillegsestimering – marginale eksterne kostnader av personskader i jernbane- og vegtransportulykker

Følgende tabell viser de estimerte marginale eksterne kostnadene av personskader i jernbanetransport og vegtransport. Her har vi brukt et annet datagrunnlag enn det vi har presentert så langt. Dette er data som kun går (fra 2006) til 2017, ikke til 2023. Det er basert på et originalt oppsett fra Rødseth et al. (2020, kap. 7), men med korrigering for underrapportering (Veisten et al., 2025b). Dataene for tog er for så vidt konsistente med det vi har presentert ovenfor, med samme kombinerings av SJT og SVV/TRULS, men kun til og med 2017, for å opprettholde konsistens med behandlingen av andre transportmiddel.

Tabell 4.17: Estimerte marginale eksterne kostnadsdelers samt interne kostnader av personskader i jernbane- og vegtransport-ulykker (basert på data fra 2006 til 2017), for året 2025 (i 2025-kr).

X	Kroner per kjøretøykilometer - personskader ved transportulykker				Marginal ekstern kostnad mht. transportarbeid	
	Marginal ekstern kostnad	Fysisk eksternalitet	System-eksternalitet	Marginal intern kostnad	Kr/personkm	Kr/tonnkm
Godstog	0,48	0,47	0,01	0,05		0,003
Persontog	1,08	1,01	0,07	0,27	0,01	
Fotgjenger	0,54	0,06	0,48	2,47	0,54	
Sykkel	1,43	0,32	1,11	6,55	1,43	
MC/Moped	0,68	0,16	0,52	2,33	0,62	
Personbil	0,24	0,16	0,07	0,31	0,13	
Buss	0,52	0,47	0,05	0,22	0,06	
Varebil/kombibil	0,08	0,07	0,01	0,05		0,77
Lastebil (alle)	0,52	0,48	0,04	0,15		0,11
Annet (vegtransport)	1,20	0,64	0,57	3,25	1,09	

Med et litt annet datagrunnlag får vi også litt endrede estimater for jernbanen; estimatene i tabell 4.17 ligger litt lavere enn hovedestimatene for tog i tabell 4.15, tabell 4.18 og tabell 4.16. Om vi sammenlikner tog med andre transportmiddel, så ligger de marginale eksterne kostnadene for tog relativt høyt mht. trafikkarbeidet (kjøretøykm/togkm), som forventet. For marginale eksterne kostnader mht. transportarbeidet har tog de klart laveste estimatene.

4.4.2 Materielle skader i ulykker

4.4.2.1 Hovedestimering av marginale eksterne kostnader av materielle skader i togulykker persontog

Følgende tabeller viser de estimerte marginale eksterne kostnadene av materielle skader i jernbane-ulykker, for de ulike togtypene og ulykkestypene.

Tabell 4.18: Estimerte marginale eksterne kostnader av materielle skader i togulykker, for året 2025 (i 2025-kr).

Tog-kategori/ulykkestype	Marginale eksterne kostnader av materielle skader v/ jernbanetransportulykker		
	Kroner per kjøretøykm (togkm)	Kroner per personkm	Kroner per tonnkm
Godstog	0,26		0,001
Persontog	0,94	0,01	
Annet tog	4,05	2,71	
Godstog (inkl. 50% «Annet tog»)	0,77		0,003
Persontog (inkl. 50% «Annet tog»)	1,04	0,01	
Av-/påstigning	0,04	0,0006	
Avsporing	0,005	0,00008	
Person-påkjørrel	0,00001	0,0000001	
Motpartulykke-tog	0,18	0,003	
Motpartulykke-vegkjøretøy	0,11	0,002	
Sammenstøt-diverse	0,33	0,005	
Annet	0,13	0,002	

Tabell 4.19: Estimerte marginale eksterne kostnadsdeler samt interne kostnader av materielle skader i togulykker, per kjøretøykm, for året 2025 (i 2025-kr).

Tog-kategori/ulykkestype	Kroner per kjøretøykilometer - materielle skader ved jernbaneulykker		
	Systemeksternalitet	Fysisk eksternalitet	Intern (fysisk internalitet)
Godstog	0,14	0,12	0,29
Persontog	0,76	0,17	1,53
Annet tog	2,97	1,08	5,94
Godstog (inkl. 50% «Annet tog»)	0,53	0,24	1,06
Persontog (inkl. 50% «Annet tog»)	0,84	0,20	1,68
Av-/påstigning	0,04	0	0,08
Avsporing	0,005	0	0,01
Person-påkjørrel	0,00001	0,000002	0,00001
Motpartulykke-tog	0,06	0,12	0,12
Motpartulykke-vegkjøretøy	0,08	0,03	0,15
Sammenstøt-diverse	0,31	0,02	0,61
Annet	0,13	0	0,27

Persontog har litt høyere marginale eksterne kostnader for materielle skader i ulykker, per kjøretøykm, enn godstog. «Annet tog» har de klart høyeste marginale eksterne kostnadene. Mht. ulykkestypene er det høyest estimert ekstern marginal kostnad for sammenstøt-diverse, og deretter motpartulykker, motpartulykke-tog og motpartulykke-vegkjøretøy (Tabell 4.18).

Systemeksternaliteten er litt høyere enn den fysiske eksternaliteten; uten videre grunnlag satte vi ex-ante verdsetting av materiellskaderisiko (a) lik den eksterne ex-post-kostnaden (c). Den estimerte interne marginale kostnaden av materielle skader i togtransporten ligger så vidt i overkant av den estimerte eksterne kostnaden (tabell 4.19).

Vi understreker nok en gang at beregningene av marginale eksterne kostnader for materielle skader i togulykker må regnes som forholdsvis usikre.

4.4.2.2 Tillegsestimering – marginale eksterne kostnader av materielle skader i jernbane- og vegtransportulykker

Følgende tabell viser de estimerte marginale eksterne kostnadene av materielle skader i jernbane-transport og vegtransport. Også for materielle skader har vi brukt et litt annet datagrunnlag enn det vi har presentert ovenfor, men med samme enkelthendelseskostnader for tog. Tidsserien går altså fra

2006 til kun 2017 (basert på oppsettet fra Rødseth et al., 2020, kap. 7), først med underrapporterings-korrigerings av personskaderisikoen, og så multiplisering med en faktor lik 2, for alle transportmiddel, for å estimere risikoen for ulykke materiell skade (Veisten, 2025).

Tabell 4.20: Estimerte marginale eksterne kostnadsdeler samt interne kostnader av materiell skader i jernbane- og vegtransport-ulykker (basert på data fra 2006 til 2017), for året 2025 (i 2025-kr).

X	Kroner per kjøretøykilometer - materielle skader ved transportulykker				Snitt/ tilfelle (kr)	Marginal ekstern kostnad mht. transportarbeid	
	Marginal ekstern kostnad	Fysisk eksternalitet	System-eksternalitet	Marginal intern kostnad		Kr/personkm	Kr/tonnkm
Godstog	1,26	0,40	0,86	0,86	5 380 000		0,005
Persontog	2,00	0,37	1,62	1,62	3 870 000	0,02	
Fotgjenger	0,0003	0,0002	0,00006	0,00006	36	0,0002	
Sykkel	0,04	0,04	0,009	0,009	2 000	0,04	
MC/Moped	0,08	0,02	0,06	0,06	4 200	0,07	
Personbil	0,12	0,05	0,08	0,08	37 500	0,07	
Buss	0,25	0,12	0,13	0,13	282 200	0,03	
Varebil/kombibil	0,03	0,01	0,02	0,02	70 200		0,30
Lastebil (alle)	0,15	0,08	0,07	0,07	78 400		0,02
Annet (vegtransport)	1,07	0,14	0,93	0,93	156 500	0,97	

Med et litt annet datagrunnlag får vi litt endrede estimater for jernbanen; estimatene i tabell 4.20 ligger noe høyere enn hovedestimatene for tog, i tabell 4.18 og tabell 4.19. For marginale eksterne kostnader mht. transportarbeidet har tog de laveste estimatene.

Det var allerede indikert at de gjennomsnittlige kostnadene per materielt skadetilfelle for tog ville ligge relativt høyt, om enn noe under det nivået som var gitt fra Vy-dataene med oppblåsing til nasjonale estimater (tabell 4.12). For vegtransporten vil den eksponeringsvektede summen ligge litt under 40 tusen kr per skadetilfelle, og om vi så bort fra underrapportering så ville dette vektete estimatet nærme seg 60 tusen kr per skadetilfelle; dette skulle stemme godt overens med offisielle kostnadsanslag (Statens vegvesen, 2021).

Uansett så er beregningene av marginale eksterne kostnader for materielle skader i transportulykker å regne som svært usikre, foretatt uten datagrunnlag, kun med bruk av kalibrering mot enkelte kostnadsanslag fra andre kilder, og med sterke antakelser som i seg selv vil påvirke estimatene.

4.5 Feilkilder/forbehold

4.5.1 Personskader i ulykker

Vi vil mene at datagrunnlaget for våre hovedestimeringer for jernbanen er forbedret, sammenliknet med det som lå til grunn i Rødseth et al. (2020, kap. 7). Likevel har vi fortsatt utfordringer med å sette sammen ulike datakilder (SJT og SVV/TRULS), der vi har basert oss på forutsetninger/regler uten å kunne kjenne de spesifikke ulykker som er registrert i begge de to kildene. Det vil også være utfordringer med identifisering av transportulykker (versus rene arbeidsulykker, som ikke foregår i eller påvirker trafikkert spor), og vi har brukt en forenklet skadegradsinndeling (tre skadegrader, basert på vegtransporten) som ikke nødvendigvis gir én-til-én overenstemmelse med SJTs inndeling med fem skadegrader.

Vi har tatt med «annet tog» både som egen kategori i analysen og som et fordelt element inn i persontog- og godstog-kategoriene. Generelt har vi kun tatt med de skadene som vi har tolket som transport-

skader. Dvs. at vi har utelatt rene arbeidsoperasjoner (utenfor trafikkert spor), og utelatt hendelser ved parkerte tog, samt utelatt vilde handlinger som har forvoldt skade. Et par større ulykker (i 2009/2010) har dratt opp det estimerte skadeantallet og -risikoen tilknyttet «annet tog»-kategorien, ulykker ved skifting der (gods)tog er kommet ut i trafikkert spor med påfølgende kollisjon og skade, som vi tolker som transportulykke. I hovedberegningene (og det som blir brakt videre til sammenstillinger av marginale eksterne kostnader, i kap. 8) har vi framhevet de estimatene for persontog og godstog der «annet tog» er inkludert (fordelt 50-50). Men vi har også presentert estimater, i dette kapitlet, basert på tre separate tog-kategorier (person, gods, annet), og da vil særlig godstog få tilordnet lavere marginal ekstern kostnad (tabell 4.15).

Det inngår også andre datakilder, som eksponeringen, og vi har lagt til grunn samme trafikkvekst og skaderisikoreduksjon som i Rødseth et al. (2020, kap. 7), og dette kan ha endret seg noe; og vil også kunne påvirke estimatene. For ex-ante-verdsettingene bruker vi etablerte offisielle tall, men verken disse eller ex-post-kostnadsestimatene (som begynner å bli gamle) er hugget i stein (Halse et al., 2021).

Likevel, med alle disse forbehold, så vil vi vurdere hovedestimatene våre, de estimerte marginale eksterne kostnadene av personskader i togtransporten, som ganske brukbare anslag.

Selv om vi for tilleggsestimeringen har et mer begrenset datasett (kun fram til 2017, ikke 2023), og selv om dette og annet har gitt litt andre estimater for persontog og godstog, så vil vi mene at disse estimatene også er anvendelige anslag.

4.5.2 Materielle skader i ulykker

Estimering av marginale eksterne kostnader av materielle skader i transportulykker var en opsjon til oppdraget, og der vi i utgangspunktet gjorde det klart at tilgangen til data og annen informasjon ville være avgjørende. Vi påpekte også at vi forventet at denne delen av analysen primært kunne vurderes som presentasjon av en metodikk, sammen med eksempelberegninger. Vi vil mene at dette er fulgt opp, og at det er lagt et grunnlag for å kunne komme et stykke lenger i neste omgang.

Ett avgjørende punkt er hvordan vi fordeler verdsettinger og kostnader (a og c), selv om vi har aggregerte størrelser som muliggjør en kalibrering. Vår 50-50-fordeling (mellom a og c) var kun å regne som en praktisk operasjonalisering. Videre antok vi en viss underreportering av materielle skadetilfeller med lavere kostnad, og la inn en bitteliten justering for dette. Vi har estimater som gir årlige totalsummer for materielle skader som vil ligge relativt nær det oppblåste nasjonale kostnadsestimatet basert på Vy-data. Men fordelingen av hendelser mellom ulike motparter og påfølgende bruk av varierte kostnader kan også påvirke de endelige estimatene.

Vi vil tro at flere studier kan være på sin plass for estimering av marginale eksterne kostnader av materielle skader i ulykker.

5 Støy

5.1 Skadekostnader ved transport

Støy er definert som uønsket lyd og/eller lyd med skadelig virkninger. Svært høye lyder kan føre til nedsatt hørsel, mens støy som vi blir utsatt for i bomiljøet vårt, f.eks. fra veg og skinnegående trafikk, industri og næringsvirksomhet, vanligvis ligger under nivåer som gir hørselsskade. Det er imidlertid velkjent at slik støy kan forstyrre kommunikasjon, konsentrasjon, hvile og søvn. Støy anses som en stressfaktor som kan bidra til mistriksel og økt risiko for sykdomsutvikling.

En viktig indikator for støyens negative virkninger er støyplage. Støyplage kan ses på som en stressreaksjon som involverer fysiologiske, følelsesmessige, kognitive og atferdsresponser. En rekke studier viser at andelen som rapporterer sterk støyplage og søvnforstyrrelser som følge av støy, øker med økende støynivåer utenfor bolig (WHO, 2018).

Støy fra skinnegående trafikk, hovedsakelig jernbane, er den nest største kilden til støy i Norge etter vegtrafikk. Antall støyutsatte fra skinnegående trafikk gikk samlet sett ned fra 1999 til 2019, fra cirka 90 000 til 62 000 (SSB, 2021). Ved samme støynivå er jernbanestøy rapportert å være mindre plagsomt enn støy fra fly, men noe mer plagsomt enn vegtrafikkstøy når støynivåene er over Lden 55 dB (Guski et al., 2017). Godstog på natt har gjerne høye maksimale støynivåer og øker sannsynligheten for oppvåkninger. I undersøkelser er det vist at togstøy generelt gir høyere andel selvrapporterte søvnforstyrrelser enn vegtrafikkstøy ved samme støynivå om natten (Basner & McGuire, 2018).

Ifølge Verdens helseorganisasjon (WHO) er både sterk støyplage og alvorlige søvnforstyrrelser som følge av støy et helsetap som bør forebygges. Videre er det i en systematisk gjennomgang i regi av WHO påvist forhøyet risiko for iskemisk hjertesykdom (hjerteinfarkt og angina pectoris) ved lengre tids eksponering for støy; dette er først og fremst vist i studier av vegtrafikkstøy (Van Kempen et al., 2018), men enkelte studier viser også en sammenheng mellom eksponering for togstøy og økt risiko for kardiovaskulær sykdom (Pyko et al., 2023). Mekanismene som er foreslått for mulig sykdomsutvikling som følge av støy, er basert på eksperimentelle funn. Her er det påvist at høye støynivåer kan utløse fysiologiske responser som er typiske for stress, som økt hjerterefrekvens, økt blodtrykk samt utskillelse av stresshormoner (Sørensen et al., 2024). Det er holdepunkter for at særlig støy om natta kan bidra til redusert helse (Münzel et al., 2020), og forebygging av støyinduserte søvnforstyrrelser er derfor spesielt viktig for å redusere sannsynligheten for mer alvorlige helsevirkninger.

5.2 Metodevalg

I Rødseth mfl. (2019) ble metoden til Andersson og Ögren (2013) benyttet til å beregne marginale kostnader. Den kan oppsummeres i to steg:

- i. Å beregne hvor stor økning i støybelastningen vi får ved ett ekstra kjøretøy eller togsett langs en banestrekning
- ii. Å multiplisere endringen i steg i. med marginalkostnaden for 1 dB støyendring i eksponeringssintervallet og antall eksponerte

Rødseth mfl. (2019) benyttet formelapparatet til å beregne utgangsstøy (støy ved sporet) fra støyberegningens verktøyet Nord 96 til å beregne den marginale støyendringen i trinn i. De utledet enhetspriser som omfattet kostnader grunnet søvnforstyrrelser og sterk støyplage samt lettere støyplager, og som var stykkevis lineær i dB (kun økende mellom intervallene 53-56 dB, 57-64 dB og 64 dB+). Bane NORs strategiske støykartlegging ble benyttet til å beregne total skadekostnad for 1 dB støyendring (jf. trinn ii.). Det ble brukt en «tommefingerregel» til å vurdere hvordan antallet personer som utsettes for helseskadelig støy endrer seg når støyen fra jernbanen øker.

Det er flere svakheter ved den tidligere metodikken, herunder:

- at den antar at alle husstander eksponeres for den samme støyendringen
- at den ser bort fra støy fra flere kilder (baner) i beregningen av marginal støyproduksjon
- at antallet nye personer som utsettes for helseskadelig støy ved en økning i togtrafikken ikke er beregnet, men basert på et grovt anslag

I dette prosjektet har vi imøtegått disse svakhetene ved å samarbeide med Bane NOR om å gjøre nye støyberegninger for utvalgte stasjonspar hvor vi endrer trafikken med *ett ekstra* tog, relativt til dagens trafikk (hvor datagrunnlaget for basisscenarioet er hentet fra den siste foreliggende strategiske støykartleggingen til Bane NOR). For hver strekning kjøres følgende 7 beregninger:

1. Referanseberegning: Samme beregningsgrunnlag som i 2022
2. Beregning med 1 ekstra persontog på dag
3. Beregning med 1 ekstra persontog på kveld
4. Beregning med 1 ekstra persontog på natt
5. Beregning med 1 ekstra godstog på dag
6. Beregning med 1 ekstra godstog på kveld
7. Beregning med 1 ekstra godstog på natt

Basert på disse beregningene er det mulig å verdsette støyplagen for alle innbyggere som opplever et støyinnivå ved husets fasade som overstiger en kritisk grense for støyplage, angitt i dB. La c beskrive de totale årlige støykostnadene langs en strekning som funksjon av normert årsdøgntrafikk, y . Vi definerer formelt kostnadsnadene i basisscenarioet

$$c_{Basis} = c(y_{Gods,dag}, y_{Gods,kveld}, y_{Gods,natt}, y_{Person,dag}, y_{Person,kveld}, y_{Person,natt}) \quad [1]$$

Tilsvarende kan vi definere kostnadene i scenarioet med ett ekstra persontog på dagtid.

$$c_{Person,dag} = c(y_{Gods,dag}, y_{Gods,kveld}, y_{Gods,natt}, y_{Person,dag} + 1, y_{Person,kveld}, y_{Person,natt}) \quad [2]$$

Marginale kostnader – endringen i verdsettingen av helsevirkninger av støy ved at det kjøres ett ekstra persontog på dagtid langs strekningen som analyseres – kan da beregnes ved

$$MK_{Person,dag} = c_{Person,dag} - c_{Basis} \quad [3]$$

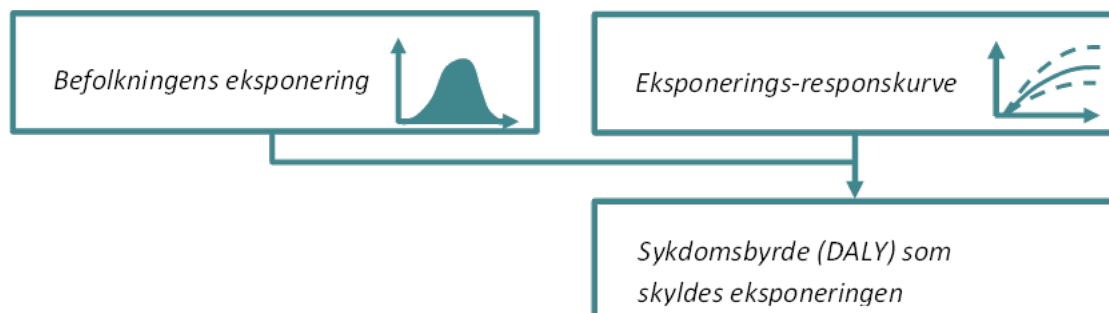
5.2.1 Verdsetting av støy

En svakhet med metodikken til Rødseth mfl. (2019) er at enhetsprisen per dB antas å være stykkevis lineær, heller enn å være kontinuerlig innenfor eksponeringsintervallet. I den nye studien benytter vi kontinuerlige funksjoner til verdsetting av støyplage og søvnforstyrrelser, og beregner disse helsetapene basert på støyeksponeringsdata i områder langs utvalgte togstrekninger og eksponeringsresponsfunksjoner fra WHO (WHO, 2018) og videre anbefalt det Europeiske miljøbyrået (EEA) (Engelmann et al., 2024). Vi vil dermed ikke kunne beskrive en enkelt enhetspris per person og dB, slik som i Rødseth mfl. (2019).

Vi har benyttet mye av det samme rammeverket til beregning av marginale skadekostnader for støy som for luftforurensning. Metoden baseres på å omregne alt helsetap fra risikofaktoren, i dette tilfelle jernbanestøy, til en felles indikator – helsetapsjusterte leveår (*Disability-Adjusted Life Years*, DALY). Analysene bygger videre på støymålene L_{den} og L_{natt} . L_{den} , er det A-veide gjennomsnittlige lydnivået (basert på et gjennomsnittsdøgn) beregnet ved fasade, vektet med 5 dB og 10 dB for henholdsvis

kveldsperioden (19.00-23.00) og nattperioden (23.00-07.00). L_{natt} er det A-veide gjennomsnittlige lydnivå for nattperioden, også beregnet ved fasade og basert på et gjennomsnittsdøgn for året. Begge indikatorene brukes i strategisk støykartlegging etter Forurensningsforskriften og er en implementering av EUs støydirektiv (direktiv 2002/49/EC).

De best dokumenterte helseeffektene av jernbanestøy er støyplage og søvnforstyrrelser (WHO, 2018). Basert på en rekke studier er det utviklet standardiserte eksponerings-responskurver for sammenheng mellom L_{den} og andel sterkt støyplagede (% Highly annoyed, %HA) og mellom støynivå på natt (L_{natt}) og andel sterkt søvnforstyrrede (% Highly sleep disturbed, %HSD). Siden sammenhengen mellom eksponering (støy) og respons (%HA eller %HSD), dvs. eksponerings-responskurven, uttrykkes ved absolutt risiko (AR) og ikke ved relativ risiko (RR), beregnes helsetapet direkte ved å kombinere eksponeringsfordeling med AR (Figur 5.1).



Figur 5.1: Metodisk rammeverk for beregning av tilskrivbar sykdomsbyrde basert på eksponerings-respons-sammenhenger uttrykt som absolutt risiko.

Vi trenger derfor ikke å beregne befolkningens tilskrivbare andel (PAF), slik som vist i kapitlet figur 3.6 i kapitlet om utslipp til luft. Videre bidrar sterk støyplage og søvnforstyrrelser kun med sykkelighetskomponenten (YLD) og ikke for tidlig død (YLL).

5.2.1.1 Befolkningens eksponeringsfordeling

Etter å ha mottatt de modellerte støydataene fra Bane NOR, kombinerte vi disse med statistiske befolkningsdata fra SSB for å etablere eksponeringsfordeling for befolkningen i det aktuelle område langs de ulike utvalgte banestrekningene. Ettersom rådataene fra Bane NOR inneholder eksponeringsverdiene for støy (L_{den} og L_{natt}) ved ulike fasadepunkter på hver bygning, ble kun ett punkt per bygning, det fasadepunktet med høyest beregnet støynivå, valgt ut for videre analyse. Dataene fra SSB viser hvor mange personer som statistisk sett bor i hver boenhet per type bygning. Årsaken til at vi ikke bruker samme metode for støy som for luftforurensning er at vi for luftforurensning arbeider med kartbaserte rutenettsdata i NetCDF-format, mens vi for støy har mottatt Excel-tabeller med støyeksponering for ulike bygninger på spesifikke adresser innen et valgt område. Derfor må vi kombinere de statistiske befolkningsdataene fra SSB med støyeksponeringsdataene for å etablere befolkningseksponeringsfordelinger.

5.2.1.2 Eksponerings-responsfunksjoner for beregning av helsetap

Eksponerings-responsfunksjonen som ble benyttet til å beregne andel sterkt støyplagede (%HA_i) ved et gitt støynivå $L_{den,i}$ er angitt nedenfor:

$$\%HA_i(\text{jernbanestøy}) = 38.1596 - 2.05538 L_{den,i} + 0.0285 L_{den,i}^2 \quad [4]$$

Tilsvarende er funksjonen for å beregne andel sterkt søvnforstyrrede ($\%HSD_i$) ved et gitt støynivå på natt $L_{night,i}$ som følger:

$$\%HSD_i(\text{jernbanestøy}) = 67.5406 - 3.1852 L_{night,i} + 0.0391 L_{night,i}^2 \quad [5]$$

Disse funksjonene er basert på sammensatte resultater (meta-analyser) fra en rekke befolkningsstudier av henholdsvis støyplage (Guski et al., 2017) og støyinduserte søvnforstyrrelser (Basner & McGuire, 2018), og er også de samme funksjonene som er anbefalt for å vurdere skadelige virkninger av støy i Forurensningsforskriftens kapittel 5 om støy, pgf. 5-11 og vedlegg 5.

5.2.1.3 Beregning av DALY

Beregningene av det totale antallet sterkt støyplagede HA og sterkt søvnforstyrrede HSD i hvert scenario ble basert på antall eksponerte individer i hver eksponeringskategori (N_i) og prosentandelen HA og HSD ($\%HA_i$ og $\%HSD_i$) avledet fra eksponerings-responsfunksjonen og summert over alle støykategorier:

$$N_{HA} = \sum N_i \times (\%HA_i) \quad [6]$$

$$N_{HSD} = \sum N_i \times (\%HSD_i) \quad [7]$$

For å beregne helsetapet som skyldes sterk støyplage (YLD_{HA}) multipliseres antall tilfeller som er sterkt støyplagede (N_{HA}) med den tilhørende helsetapsvekten (DW_{HA}). Tilsvarende gjøres for å beregne helsetapet knyttet til sterk grad av søvnforstyrrelse (YLD_{HSD}):

$$YLD_{HA} = N_{HA} \times (DW_{HA}) \quad [8]$$

$$YLD_{HSD} = N_{HSD} \times (DW_{HSD}) \quad [9]$$

DW = Disability weight; $DW_{HA} = 0.02$ and $DW_{HSD} = 0.07$

Helsetapsvektene som er benyttet er 0,02 for sterk støyplage og 0,07 for sterk grad av søvnforstyrrelse som anbefalt av WHO (WHO, 2011). Helsetapsvekten er et tall mellom 0 («helt frisk») og 1 («død») som uttrykker størrelsen på helsetapet som er forbundet med sykdommen eller skaden. Helsetapsvektene er basert på en kombinasjon av resultater fra ekspertpaneler og fra befolkningsundersøkelser, hvor deltakere har vurdert alvorlighetsgraden av ulike helsetilstander basert på hvordan disse vil påvirke daglig funksjon og livskvalitet. Størrelsen på helsetapsvektene er ment å gjenspeile den generelle befolkningens formening om helsetapet knyttet til ulike helsetilstander.

Vi har valgt å ikke summere helsetap fra sterk støypilge (HA) og sterk grad av søvnforstyrrelse (HSD) da det er betydelig overlapp mellom disse helseutfallene. På bakgrunn av resultater fra spørreundersøkelser har vi basert oss på å vekte helsetapet fra sterk støypilge med en faktor på 0,7 før vi summerer med YLD bidraget fra HSD. Tilsvarende er gjort i beregning av sykdomsbyrde fra togstøy i de nordiske land (Aasvang et al., 2023).

Siden det ikke beregnes tapte leveår (YLL) for personer som er sterkt støypilgede og sterkt søvnforstyrrede, er DALY-kostnaden for disse helseeffektene lik YLD-kostnaden. Dermed kan den totale kostnaden beregnes ved å multiplisere det totale antallet YLD med kostnaden per DALY. Siden Bane NOR gir detaljerte støydata modellert fra utslippskilden, beregnes marginalkostnaden på en annen måte enn i tilfellet med luftforurensning. I stedet for å ta den deriverte av ERF-er, kan Bane NOR gi eksponeringsdata for ulike scenarier. For hver av de 9 strekningene vi har mottatt støydata for, finnes det 7 ulike scenarier, inkludert et basisscenario (som gjenspeiler dagens støynivå). De 6 alternative scenariene er delt inn i 2 grupper: én gruppe omfatter støyeksponering ved én ekstra godstogavgang på henholdsvis dagtid, kveldstid og natt, og én gruppe omfatter støyeksponering ved én ekstra persontogavgang på henholdsvis dagtid, kveldstid og natt. Siden de alternative eksponeringsdataene gjenspeiler det nye eksponeringsnivået ved en ekstra eller marginal togtype på ulike tider av døgnet, vil forskjellen i DALY mellom et alternativt scenario og basisscenarioet gi oss den marginale helsekostnaden. Dermed finnes det for hver av de 9 jernbanestrekningene 6 ulike scenariopar.

For hvert scenariopar ble to DALY-verdier beregnet, som omfatter sykdomsbyrden knyttet til henholdsvis sterk støypilge (HA) og sterk grad av søvnforstyrrelse (HSD).

5.3 Data

Rødseth mfl. (2019) sin beregning benyttet Hovedbanen som case til analyse av marginale støykostnader. En sammenlikning med Statistisk Sentralbyrås overordnede kartlegging av jernbanestøy i Norge viser betydelige forskjeller mellom antall personer eksponert per kilometer i case-studien (Hovedbanen) og den nasjonale studien. Dette er en svakhet ved den tidligere studien.

Det vil naturligvis være ideelt å gjennomføre støyberegningene beskrevet i kapittel 5.2 for alle jernbanestrekningene i hele landet. Dette har ikke vært forenlig med ressursrammene til Bane NOR, og vi benytter derfor case studier til å belyse marginale støykostnader også i denne studien. Men til den nye studien har vi hatt som strategi å velge ut *representative* case som viser heterogeniteten i den norske jernbanesektoren på en god måte. Dette delkapitlet starter derfor med en overordnet beskrivelse av transport på jernbane i Norge, før vi deler sektoren inn i ulike *strata* – det vil si å gruppere sammenliknbare jernbanestrekninger. Ved å velge ut case fra de ulike strataene får vi vist variasjonen i marginale støykostnader, og ved å kjenne størrelsen til de ulike strataene kan vi også finne gode vekter til å aggregere caseresultatene til populasjonsnivået.

5.3.1 Trafikkdata fra strategisk støykartlegging

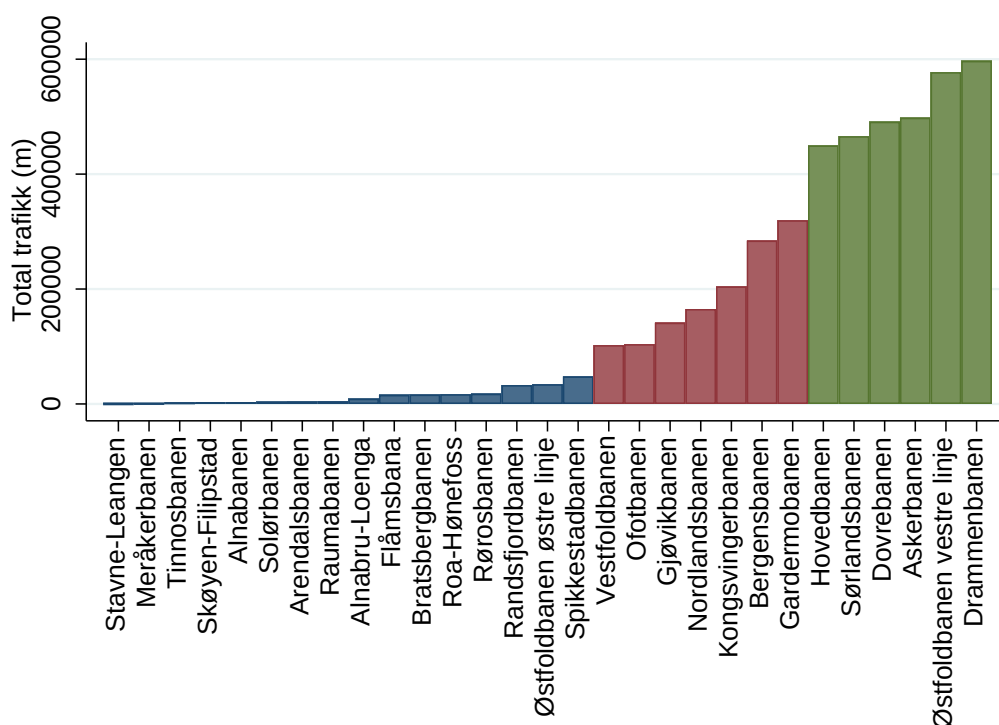
TØI har mottatt og sammenstilt trafikkdata fra den siste strategiske støykartleggingen fra 2022. Dataen viser trafikk, målt i antall *togmeter*, per bane og stasjonspar (dvs. mellom to stasjoner langs en jernbane), fordelt etter togtype og over døgnet (dag, natt og kveld). På bakgrunn av dette datagrunnlaget er det mulig å identifisere

- i. Variasjoner i total trafikkbelastning, både etter bane og stasjonspar
- ii. Variasjoner i godsandel, hvor gods- og arbeidstog er mer støyende enn persontog
- iii. Variasjoner i trafikk på natten

Figur 5.2 sammenstiller total togtrafikk (i antall togmeter) per bane. Den viser at vi kan dele banene inn i 3 kategorier:

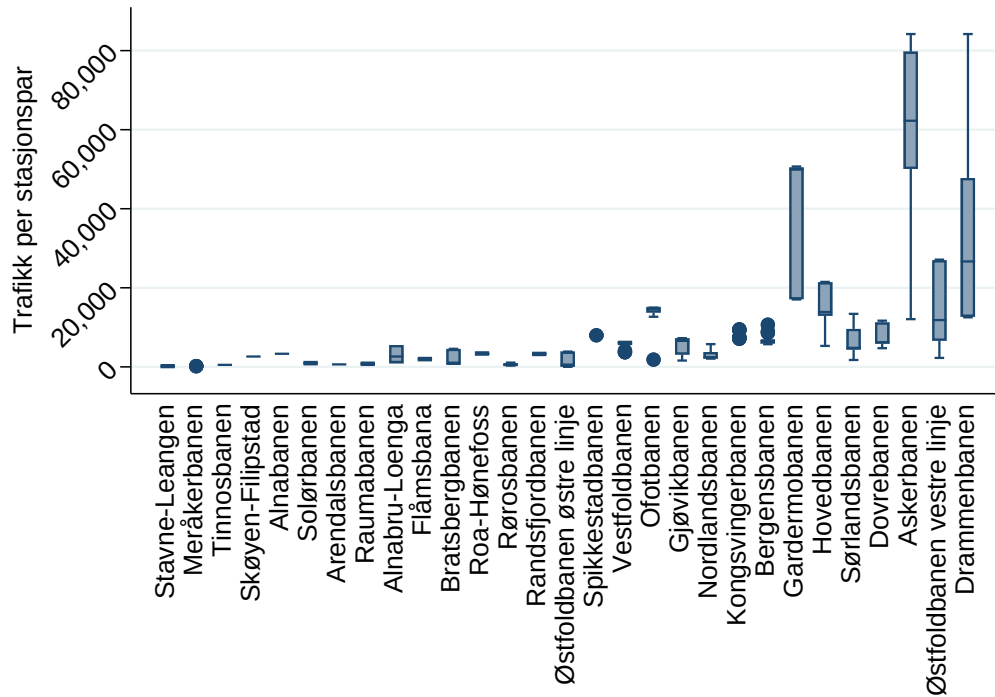
- Baner med lite trafikk: fra Stavne-Leangen til Spikkestadbanen (blå)
- Baner med medium trafikk: fra Vestfoldbanen til Gardermobanen (rød)
- Baner med høy trafikk: fra Hovedbanen til Drammenbanen (grønn)

En enkel inndeling av jernbanetrafikken i strata vil være å velge ut en bane fra hver av de tre fargekodete kategoriene. Samtidig kan det være store variasjoner i trafikk mellom stasjonspar innad i en enkelt bane. Dette er vist av figur 5.3. Den generelle konklusjonen som kan trekkes fra denne figuren er at variasjonen er størst for banene med høyest trafikk, og spesielt Gardermobanen, Askerbanen, Østfoldbanen vestre linje og Drammenbanen skiller seg ut med store variasjoner i trafikk mellom stasjonsparene innad i banen. For de øvrige banene kan vi grovt skille mellom stasjonspar med under 5 000 meter trafikk over døgnet og baner med over 5 000 meter trafikk over døgnet. 50 prosent av stasjonsparene har trafikk under 5 950 meter tog²⁰.



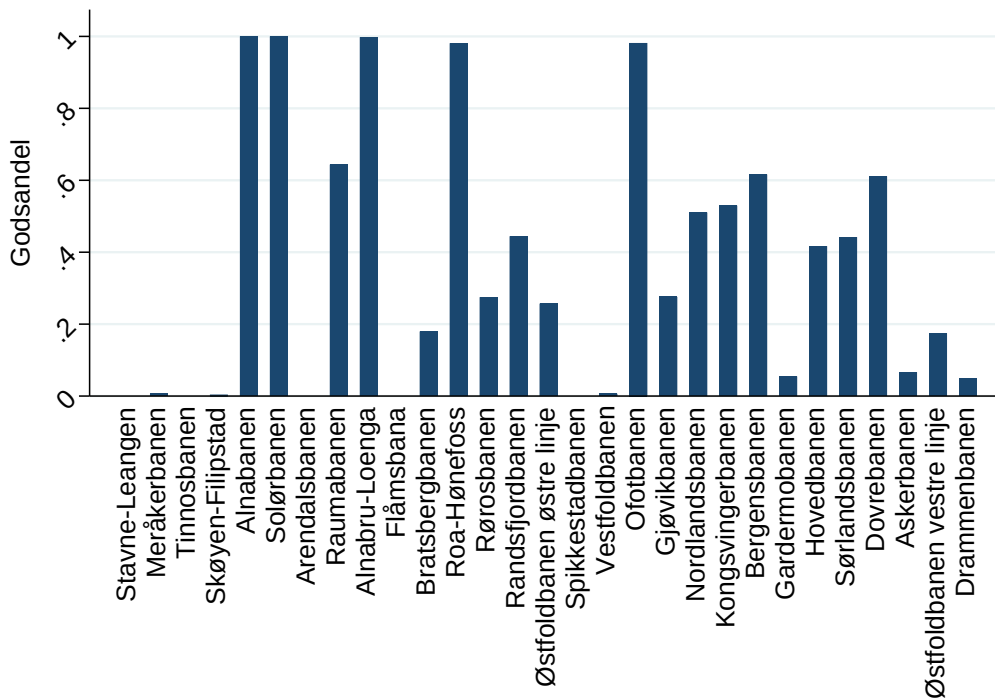
Figur 5.2: Total trafikk i antall togmeter, per bane.

²⁰ Som en tommelfingerregel kan vi si at et godstog er 400 meter langt, mens et persontog er 100 meter langt. Dersom 25 prosent av de 5 000 togmeterne er godstrafikk og 75 prosent er persontog, vil årsgodstrafikken tilsvare $(3\,750/100 + 1\,250/400)$ 41 tog.

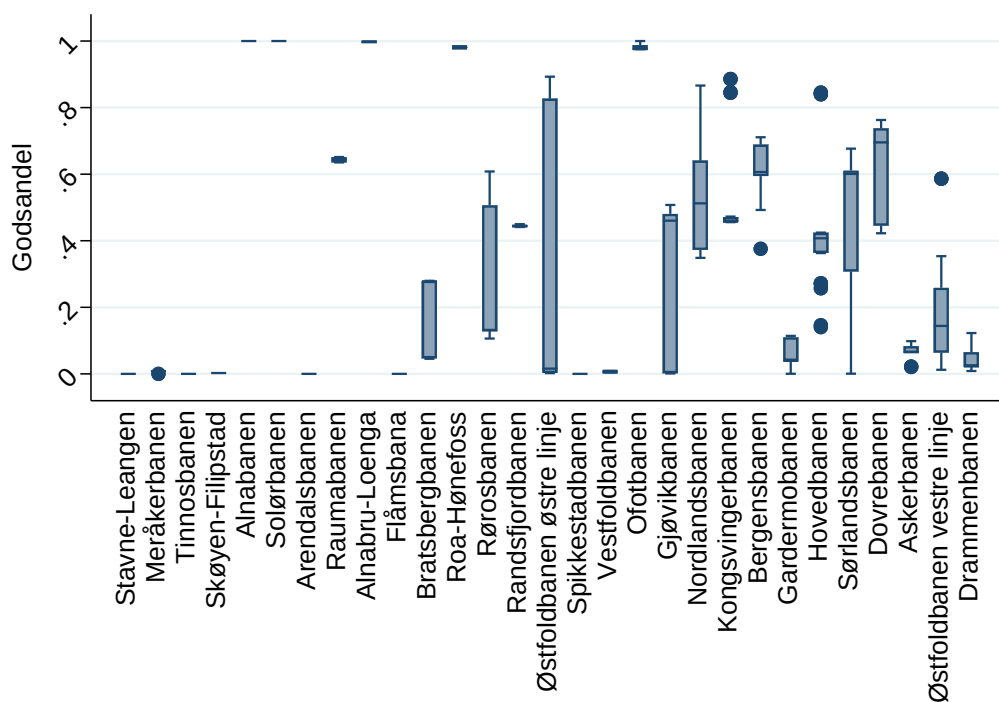


Figur 5.3: Variasjon i trafikk mellom stasjonspar, per bane.

I tillegg til totaltrafikk, er vi også opptatt av godsandelen og andel trafikk på natten. Dette er forhold som korrelerer, noe vi studerer nærmere i fortsettelsen.



Figur 5.4: Gjennomsnittlig godsandel per bane.

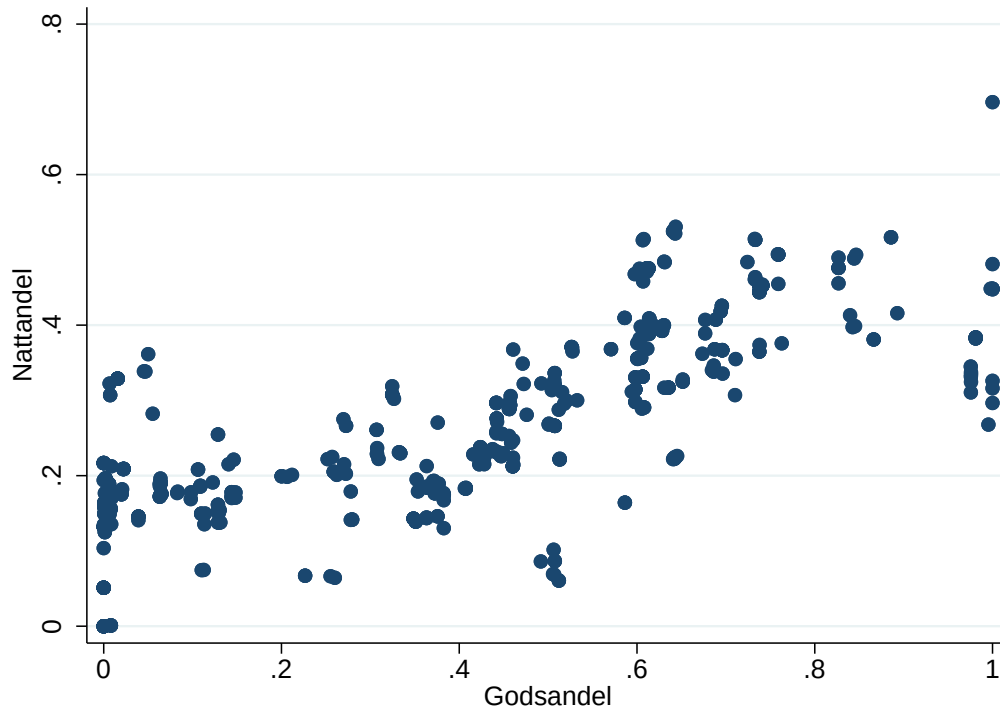


Figur 5.5: Variasjon i godsandel mellom stasjonspar, per bane.

Figur 5.4 viser gjennomsnittlig godsandel per bane, mens figur 5.5 viser hvordan godsandelen varierer mellom stasjonsparene innad i hver bane. Vi kan grovt identifisere 3 kategorier:

- Rene godsbaner: Baner hvor tilnærmet 100 prosent av trafikken er godstrafikk
- Gjennomsnittlige godsbaner: Baner hvor gjennomsnittlig godsandel overstiger 40 prosent
- Baner med lite gods: Baner hvor gjennomsnittlig godsandel er lavere enn 40 prosent

Merk at Østfoldbanens østre linje er en uteligger, med stor variasjon i godsandel mellom stasjonsparene. Også Rørosbanen viser en del variasjon i godsandeler per stasjonspar.



Figur 5.6: Sammenhengen mellom andel trafikk på natten og andelen godstrafikk. Stasjonsparet Skøyen-Filipstad er utelatt fordi det er en uteligger. Dette er et sidespor til og fra havna Filipstad og brukt til hensetting.

Figur 5.6 viser sammenhengen mellom gods- og nattandeler per stasjonspar. Generelt er det en positiv sammenheng. Basert på dette mener vi at godsandel vil være et tilstrekkelig kriterium for utvelgelse av case, og at andelen trafikk på natten ikke behøves å vektlegges. Trafikk på natten korrelerer med godsandelen, og bruk av flere utvalgsriterier bidrar til å komplisere utvelgesprosessen.

5.3.2 Tettstedsklassifiseringen

Vi ser også på klassifiseringen av stasjonspar etter tettstedstype, hvor klassifiseringen av tettsted følger definisjonen til Statistisk Sentralbyrå: En hussamling skal registreres som tettsted dersom det bor minst 200 personer der. Avstanden mellom husene skal normalt ikke overstige 50 meter, men for noen arealkrevende bygningstyper – som boligblokker, industribygg, kontor/forretningsbygg, skoler, sykehus osv. – kan avstanden økes til 200 meter. Tilgrensende bebygde og opparbeidede områder, som parker, idrettsanlegg og industriområder, skal være del av tettstedet. Husklynger med minst 5 næringsbygninger eller 5 boligbygninger tas med inntil en avstand på 400 meter fra tettstedskjernen.

Vi tar utgangspunkt i SSBs definisjon på tettsted, som deles videre inn i tre kategorier etter størrelse på tettstedene. Tabell 5.1 viser kriteriene for hvordan tettstedene er fordelt på ulike størrelseskategorier. I tillegg kommer en fjerde kategori, nemlig «utenfor tettsted», som er områder hvor bebyggelsen er så spredt at det ikke faller inn under SSBs definisjon på tettsted.

Tabell 5.1: Oversikt over inndelingen av tettsted etter befolkningsstørrelse.

Kategori	Befolkning
Spredt bebyggelse og utenfor tettsted	Færre enn 15 000
Lite tettsted	Mellom 15 000 og 100 000
Stort tettsted	Over 100 000

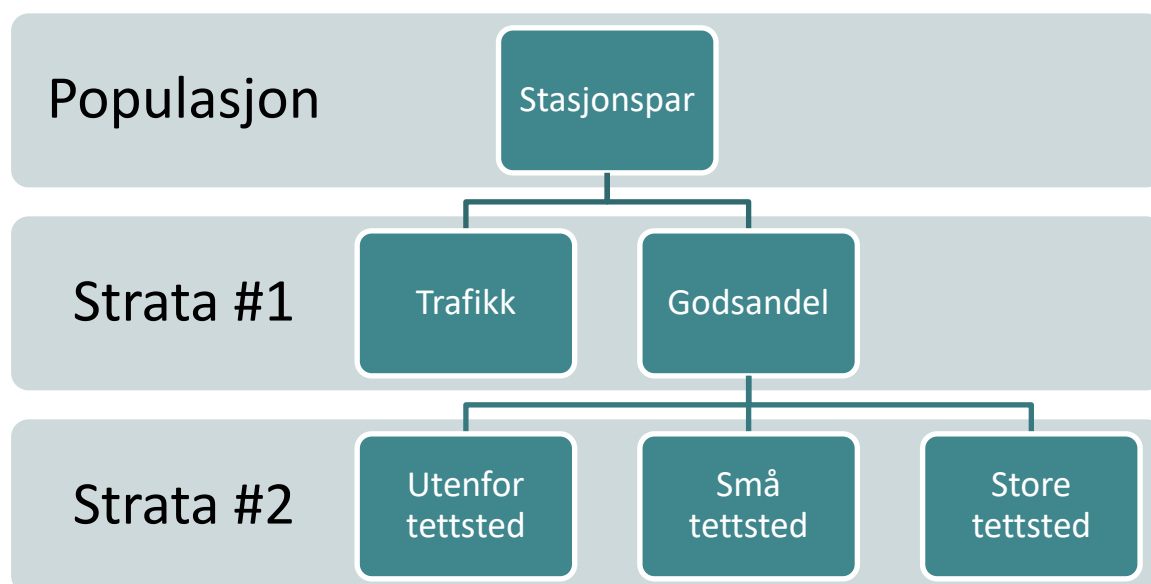
I det følgende velger vi pga. prosjektets ressurskranker å begrense klassifiseringen av tettstedstyper til utvalgte baner som viser tilstrekkelig intern variasjon mellom stasjonsparene når det gjelder trafikk-mengde og godsandel. Tabell 5.2 gir en opptelling av antall stasjonspar langs Drammenbanen, Gardermobanen, Gjøvikbanen, Sørlandsbanen og Østfoldbanen vestre linje etter deres tettstedskategori.

Tabell 5.2: Antall stasjonspar per tettstedskategori for utvalgte baner på Østlandet.

	Antall	Andel (%)
Utenfor tettsted	51	31,48
Spredt bebyggelse	45	27,78
Lite tettsted	13	8,02
Stort tettsted	53	32,72

5.3.3 Stratifisering og utvelgelse av case

Figur 5.7 illustrerer vår metodikk for utvelgelse av case til analysen av marginale støykostnader.



Figur 5.7: Metodikk for case-utvelgelse.

Det er totalt 529 stasjonspar i Bane NORs datasett. I det første steget deler vi disse inn i 3 kategorier basert på stasjonsparenes trafikkmengde og godsandel (jf. tidligere drøftinger av disse variablene). Vi definerer totalt 3 strata i delkategori Strata #1. Hver av de 3 strataene deles så inn etter tettstedstype i Strata #2. Totalt gir dette $3 \times 3 = 9$ strata (grupper av observasjoner).

I det følgende gis en mer detaljert beskrivelse av utvelgelse av de 9 strataene.

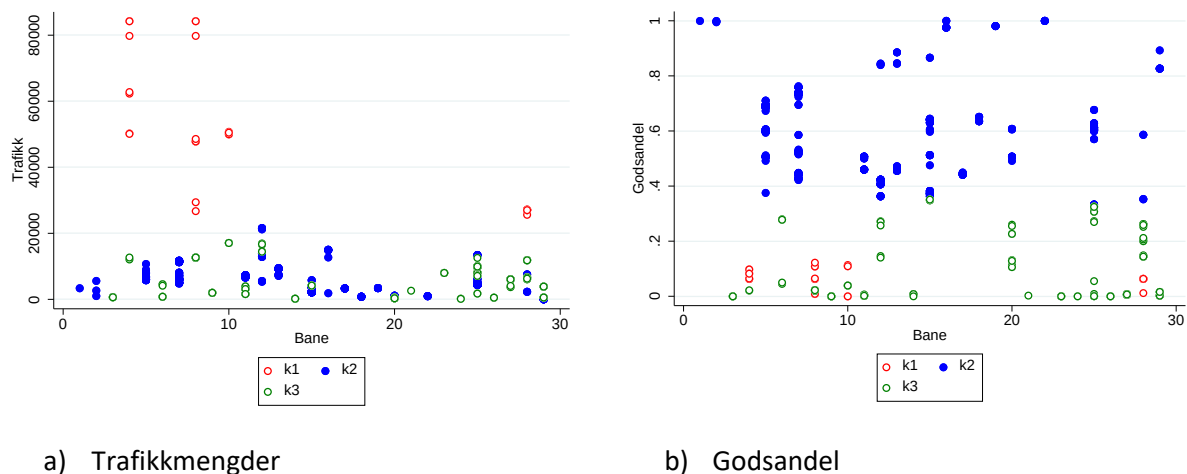
Strata #1

Banene varierer mht. trafikk og godsmengde, noe som tyder på at det er viktig å tillate en fleksibel utvelgelse av stasjonspar til analysen for å vise variasjoner i eksterne støykostnader mellom baner og stasjonspar. Samtidig er det viktig at inndelingen i antall strata ikke blir for omfattende, noe som kan gjøre det arbeidskrevende for Bane NOR å gjennomføre støyanalysen. For å imøtegå denne bekymringen foreslår vi å bruke clustering-metoden *k-means* til utvelgelsen i steg #1. K-means tar utgangspunkt i

at antall strata er valgt på forhånd, og plasserer stasjonsparene i hvert stratum ut fra målet om å minimere euklidsk distanse mellom observasjonene i hvert stratum (dvs. at enhetene i hvert stratum er så like som mulig, gitt de karakteristika som brukes i analysen).

Vi ber i steg #1 k-means om å dele dataene inn i 3 grupper, og deler variablene brukt til utvelgelsen (trafikk og godsandel) på sine gjennomsnitt før utvelgelsen for å unngå at variabelenes relative størrelser påvirker inndelingen.

Figur 5.8 viser inndelingen av de 529 stasjonsparene i 3 strata basert på k-means og kriteriene i) trafikkmengde og ii) godsandel per stasjonspar.



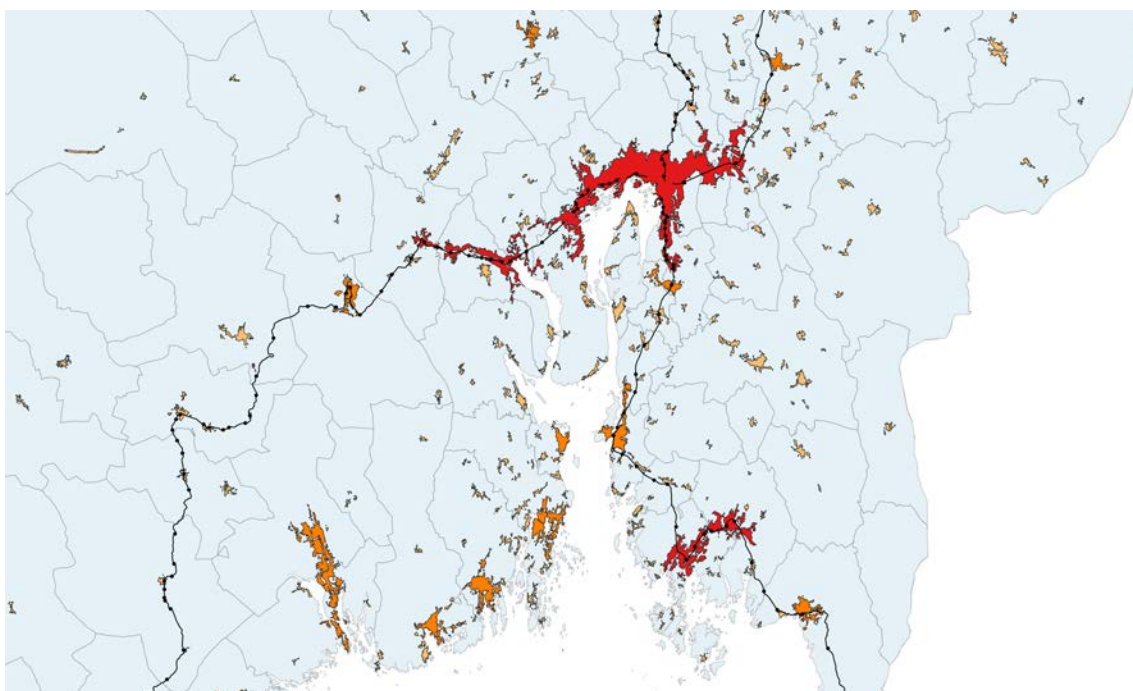
Figur 5.8: Inndeling av stasjonsparene i 3 strata (k1-k3) ved bruk av k-means. Kriterier: Trafikkmengde og godsandeler per stasjonspar.

De 3 strataene kan beskrives på følgende måte:

- k1: Stasjonspar med høy trafikk og lav godsandel
- k2: Stasjonspar med lav trafikk og høy godsandel
- k3: Stasjonspar med lav trafikk og lav godsandel

Strata #2

Det neste steget innebærer å fordele ulike stasjonspar eller strekninger etter hvilken tettstedskategori de tilhører. Det gjøres ved å benytte seg av kartdata og enkle GIS-analyser basert på tettstedskart fra SSB og stasjonsplasseringer fra Bane NOR. Vi tar utgangspunkt i banene Drammenbanen, Gardermobanen, Gjøvikbanen, Sørlandsbanen og Østfoldbanen vestre linje, og kombinerer dem med tettsteder i henhold til de ulike størrelseskategoriene. Disse banene er valgt ut fordi de har mange stasjonspar, og fordi stasjonsparene innad i linjene viser god spredning mellom strataene k1-k3 som ble definert i forrige delkapittel. Figur 5.9 viser hvordan GIS er brukt til å kombinere stasjoner og strekninger med tettsteder av ulik størrelse.



Figur 5.9: Utsnitt av utvalgte baner, stasjoner og deres plasseringer i hhv. stort tettsted (rødt), lite tettsted (oransje) og utenfor tettsted (beige og blått).

Deretter kategoriserer vi alle stasjonspar etter hvilken tettstedskategori de tilhører. Metoden som er brukt innebærer at dersom stasjonsparet går fra sted A til sted B, er det plasseringen til sted B som er gjeldende tettstedskategori. Samtidig lager vi en binær indikator, 0 eller 1, på hvorvidt hele strekningen går innenfor samme tettstedskategori (1) eller om strekningen går gjennom andre tettstedskategorier. Omtrent 50 prosent av strekningene er utelukkende innenfor samme tettstedskategori.

Vi går videre ved å velge ut tre baner, nemlig Gardermobanen (9 par), Østfoldbanen vestre linje (37 par), Sørlandsbanen (71 par). Disse sikrer variasjon innenfor både k-gruppe (strata #1) og tettstedskategori (strata #2). Tabell 5.3 viser antall strekninger fordelt på de ulike kategoriene.

Tabell 5.3: Oversikt over antall strekninger i ulike k-grupper og tettstedskategorier.

k-gruppe	Utenfor tettsted	Lite tettsted	Stort tettsted
k1	3	1	16
k2	42	2	5
k3	29	7	12

5.3.4 Input til Bane NORs nye støyberegninger

I dette delkapitlet beskriver vi utvelgelse av case og andre sentrale input til Bane NORs nye støyberegninger, som beskrevet i kapittel 5.2.

Valg av case

For å finne et utvalg av $3 \times 3 = 9$ strata stasjonspar, tar vi utgangspunkt i gjennomsnittlig total trafikk-mengde og godsandel innenfor én gruppe, for alle gruppene vist i Tabell 5.3. Deretter velger vi strekningen som likner mest på gjennomsnittet i gruppen. Et utvalgsriterium er at hele strekningen går innenfor samme tettstedskategori (unntaket er for «lite tettsted» i «k1-gruppen» pga. kun én observa-

sjon). Tabell 5.4 viser endelig liste for utvalgte stasjonspar i alle strata, som også er ferdigstilt i samråd med Bane NOR²¹.

Tabell 5.4. Utvalgte strekninger fordelt på alle strata.

k-gruppe	Utenfor tettsted	Lite tettsted	Stort tettsted
1	Gardermobanen: Langeland-Gardermoen	Østfoldbanen: Langhus-Ski*	Østfoldbanen: Hauketo-Holmlia
2	Sørlandsbanen: Bø-Lunde	Sørlandsbanen: Grovane-Vennesla	Sørlandsbanen: Steinberg-Hokksund
3	Sørlandsbanen: Darbu-Krekling	Østfoldbanen: Sandbukta-Moss	Østfoldbanen: Fredrikstad – Lisleby

*Hele strekningen går ikke utelukkende gjennom kategorien «lite tettsted».

En strekning er her definert som et stykke jernbane som strekker seg fra ett referansepunkt til neste, der referansepunktene er gitt i Bane NORs infrastrukturdatabase BaneData. I Bane NORs trafikkdatabase registreres togpasseringer ved disse referansepunktene. Stasjoner og holdeplasser er referansepunkter, men det kan også ligge referansepunkter andre steder. Langeland på Gardermoen er et eksempel på et referansepunkt som ikke ligger ved en stasjon eller holdeplass.

Valg av togtype

Vi mener at det er hensiktsmessig å velge ut de *mest vanlige* togtypene til analysene. For godstransport er utvelgelsen enkel, ettersom data kun skiller mellom elektriske tog og dieseltog. Både på Gardermo-, Sørlands- og Østfoldbanen er elektriske godstog dominerende. Vi anbefaler derfor å bruke togtypen elektrisk godstog til alternativberegningene for godstransport. Elektrisk godstog står for rundt 65% av godstogtrafikken på alle baner i Norge.

For persontog har vi mer detaljerte data, som inkluderer informasjon om trafikk fordelt på ulike togtyper. På Gardermobanen står togtypen BM74/75, i snitt for rundt 70 prosent av persontogtrafikken, mens på Sørlands- og Østfoldbanen er BM73 dominerende med rundt 45 prosent av trafikken. Begge togtypene er elektriske motorvognsett. En dybdeanalyse viser at enkelte stasjonspar langs Østfoldbanen har høyest andel av trafikk med BM69, men at disse stasjonsparene allikevel har god representasjon av BM74/75. Vi anbefaler derfor å basere analysene på BM73 eller BM74/75. Konkret anbefaler vi bruk av BM73 til å beregne den marginale støykostnaden knyttet til et persontog for strekningene Bø-Lunde, Grovane-Vennesla og Fredrikstad-Lisleby, og BM74/75 for øvrige stasjonspar.

Merk at støyberegningene til Bane NOR tar utgangspunkt i antall meter tog. Det innebærer at Bane NOR legger til et normert antall togmeter (dvs. lengden på et ekstra tog av den utvalgte typen, i tillegg til antall togmeter oppgitt i datagrunnlaget til strategisk støykartlegging for 2022) når de gjennomfører sine scenarioberegninger. I tilfeller hvor togtilbudet betjenes av doble togsett i ulike perioder av døgnet brukes gjennomsnittlig antall meter tog (eks. dersom en rute har 20 avganger per døgnet, og hvor 5 av disse kjøres med doble togsett, blir antall ekstra togmeter lik $(15 \cdot 100 + 5 \cdot 2 \cdot 100) / 20 = 125$ meter for et konvensjonelt persontog med lengde på 100 meter).

²¹ Opprinnelig var stasjonsparet Langemyr-Dalane valgt ut til kategorien (k=2; lite tettsted). Selv om klassifiseringen var riktig, bemerket Bane NOR at store deler av denne strekningen går gjennom et industriområde. Stasjonsparet ble derfor byttet ut med Grovane-Vennesla. Merk at det aktuelle tettstedet kun har 13 500 innbyggere (altså marginalt lavere enn grensen på 15 000 innbyggere), men vi mener at dette utgjør en mindre feilkilde enn å velge Langemyr-Dalane, hvor det bor langt færre personer langs jernbanespooret grunnet industrivirksomhet.

5.3.5 Gjennomføringen av Bane NORs nye støyberegninger

For hver strekning kjøres 7 beregninger:

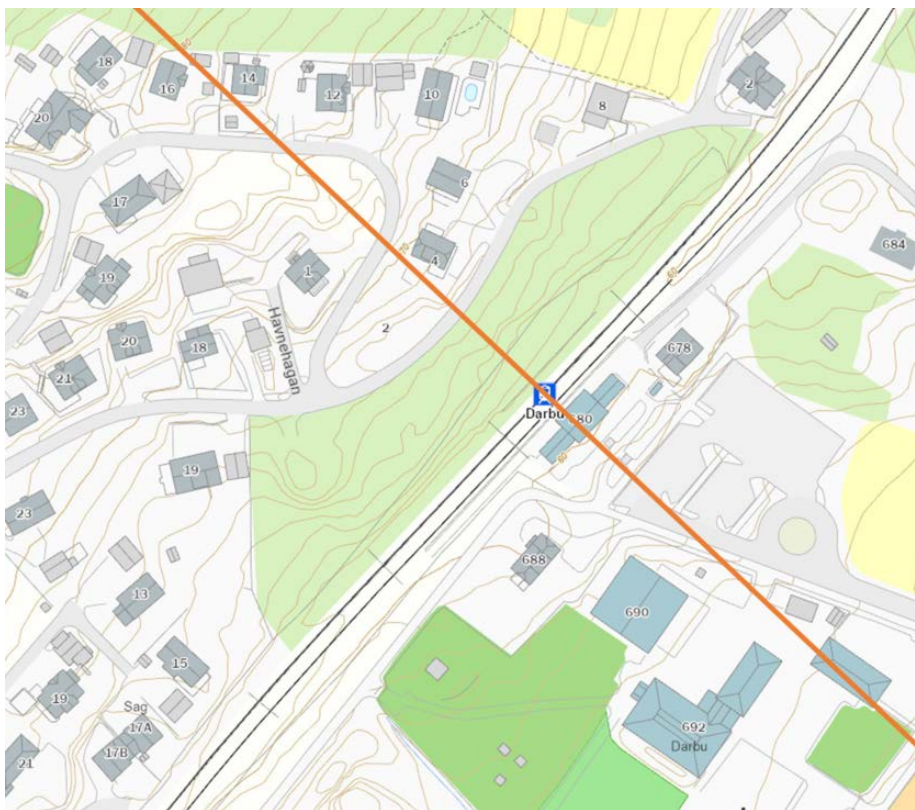
1. Referanseberegning: Samme beregningsgrunnlag som i 2022
2. Beregning med 1 ekstra persontog på dag
3. Beregning med 1 ekstra persontog på kveld
4. Beregning med 1 ekstra persontog på natt
5. Beregning med 1 ekstra godstog på dag
6. Beregning med 1 ekstra godstog på kveld
7. Beregning med 1 ekstra godstog på natt

Dag, kveld og natt er definert som hhv. periodene 07-19 (12 timer), 19-23 (4 timer) og 23-07 (8 timer). I beregninger etter indikatoren L_{den} får trafikk på kveld og natt straffetillegg på hhv. 5 og 10 dB.

Beregninger utføres som standard i 4 meters høyde over bakken.

Støyutsatte bygninger regnes som tilhørende en strekning hvis nærmeste punkt på jernbanen til bygningens midtpunkt ligger innenfor denne strekningen. Det vil i praksis si at grensen for hvilke bygninger som regnes å være utsatt for støy fra en strekning går normalt på jernbanen i endepunktet for strekningen. Endepunktene regnes i utgangspunktet fra der referansepunktene er plassert i [Banekart](#). Det er ofte på samme sted som stasjonsbygningen, men trenger ikke å være det.

Figur 5.10 viser hvor grensen går for hvilke boliger som regnes som utsatte for støy fra strekningen Darbu-Krekling. Merk at det er mottakerne som avgrenses, ikke kilden. I beregningene vil støykilden, altså jernbanen, være aktiv også utenfor denne grensen, slik at en bolig som ligger innenfor grensen kan påvirkes av støy fra jernbane både innenfor og utenfor grensen.



Figur 5.10. Eksempel på grense for støyutbredelse fra en strekning.

Støyberegningene er gjort i CadnaA, basert på kart- og trafikkgrunnlag fra 2021 og støyberegningssmetoden Nord96. Med beregning av faktisk trafikk som referanse, ble det satt opp varianter med hhv. ekstra person- og godstog på dag, kveld og natt. Med referanse og 6 varianter pr. område, ble det totalt gjennomført 63 beregninger.

Statistikk over innfallende fasadenivå kan hentes direkte ut av CadnaA.

5.4 Resultater

Vi implementerer støyberegningene som beskrevet i kapittel 5.3 og beregner marginale kostnader ved bruk av likning 3 i kapittel 5.2. Denne beregningen gir totale årlige kostnader ved ett ekstra tog i løpet av et normert driftsdøgn. For å kunne regne denne årlige endringen i skadekostnader om til en kostnad per togkilometer følger vi Rødseth mfl. (2019) og deler kostnadene på 365 (driftsdøgn) ganget med trasélengden (antall kilometer spor for den enkelte strekning).

Tabell 5.5 sammenstiller de estimerte marginalkostnadene etter strata, togtype (goods og persontog), tid på døgnet og etter type tettsted. Tabellen viser at det er et ekstra godstog på natten som gir det største støybidraget, mens persontog gir et lavt støybidrag.

Tabell 5.5: Estimerte marginale støykostnader (MK) i 2023-kroner etter strata #1, togtype, tid på døgnet og tettstedskategori.

Strata #1	Type	Døgn	MK		
			Utenfor tettsted	Lite tettsted	Stort tettsted
1	Goods	Dag	2,3	0,5	14,2
1	Goods	Kveld	6,6	3,5	67,8
1	Goods	Natt	116,3	53,4	783,8
2	Goods	Dag	0,4	0,4	1,1
2	Goods	Kveld	0,9	1,1	4,0
2	Goods	Natt	12,2	17,2	71,5
3	Goods	Dag	0,4	2,8	1,2
3	Goods	Kveld	1,5	9,6	5,8
3	Goods	Natt	22,3	156,3	102,8
1	Person	Dag	0,0	0,0	0,0
1	Person	Kveld	0,1	0,0	0,0
1	Person	Natt	24,4	0,4	0,0
2	Person	Dag	0,0	0,0	0,1
2	Person	Kveld	0,1	0,1	0,2
2	Person	Natt	0,5	0,9	0,9
3	Person	Dag	0,0	0,1	0,0
3	Person	Kveld	0,0	0,1	0,1
3	Person	Natt	0,2	1,4	6,1

Vi bruker populasjonsvekter – beregnet basert på total togtrafikk analysert i kapittel 5.3.1 – til å ekstrapolere case-resultatene til populasjonsnivået, dvs. til hele jernbanenettet i Norge. Strata k1 får en vekt på ca. 0,05, k2 en vekt på ca. 0,59 og k3 en vekt på ca. 0,36. Disse vektene angir andelen av totale togkilometer per strata, relativt til totalt antall togkilometer utført i hele landet. I beregningen av vektene antar vi forenklet at alle persontogtyper er 100 meter mens et gjennomsnittlig godstog er 400

meter langt²². Tabell 5.6 viser marginale støykostnader etter vektingen av de ulike casene til populasjonsnivået.

Tabell 5.6: Estimerte marginale støykostnader (MK) i 2023-kroner per togkilometer etter togtype, tid på døgnet og tettstedskategori.

Type	Døgn	MK	MK	MK
		Utenfor tettsted	Lite tettsted	Stort tettsted
Gods	Dag	0,5	1,3	1,8
Gods	Kveld	1,4	4,2	8,0
Gods	Natt	21,2	68,8	119,8
Person	Dag	0,0	0,0	0,0
Person	Kveld	0,0	0,1	0,1
Person	Natt	1,6	1,0	2,7

5.5 Sensitivitetstesting og sammenlikning med tidligere studier

Vi starter med en sammenlikning av beregningene til Rødseth mfl. (2019) med de nye estimatene av marginale skadekostnader ved støy. Den er gitt av tabell 5.7, som viser at de nye beregningene er konsistent lavere enn de gamle²³.

Tabell 5.7: Sammenlikning av marginale støykostnader (MK) i denne studien og i Rødseth mfl. (2019), etter togtype, tid på døgnet og tettstedskategori. Alle beregninger oppgitt i 2025-kroner.

Studie	Type	Døgn	MK	MK	MK
			Utenfor tettsted	Lite tettsted	Stort tettsted
Rødseth mfl. (2019)	Gods	Dag	3,6	12,0	12,6
Denne studien	Gods	Dag	0,5	1,3	1,8
Rødseth mfl. (2019)	Gods	Natt	33,5	116,1	122,3
Denne studien	Gods	Natt	21,1	68,5	119,4
Rødseth mfl. (2019)	Person	Dag	0,7	1,6	1,6
Denne studien	Person	Dag	0,0	0,0	0,0
Rødseth mfl. (2019)	Person	Natt	6,0	16,4	16,3
Denne studien	Person	Natt	1,6	1,0	2,7

²² Merk at vi forventer at disse tog lengdene vil være rimelige anslag for landet som helhet, men ikke nødvendigvis vil gjelde for den enkelte bane. Vi ønsker derfor å oppgi alternative vektorer for andre mulige valg av tog lengder.

Alternativ 1: Persontog 100 meter; godstog 300 meter gir vektor på hhv. 0.05 (k1), 0.60 (k2) og 0.35 (k3)

Alternativ 2: Persontog 100 meter; godstog 500 meter gir vektor på hhv. 0.05 (k1), 0.58 (k2) og 0.37 (k3)

Alternativ 3: Persontog 150 meter; godstog 400 meter gir vektor på hhv. 0.05 (k1), 0.61 (k2) og 0.34 (k3)

²³ En annen relevant sammenlikning er hvorvidt beregningene av marginale støykostnader blir lavere med FHIs metodikk, også når det gjelder beregninger for veitransport. FHI bemerker at Verdssettingsprosjektet pt ikke har beregnet marginal skadekostnad for veitrafikkstøy, og at denne sammenlikningen derfor må vente.

Det er flere mulige grunner til at resultatene varierer mellom de to studiene:

- Den nye studien har valgt case på bakgrunn av en stratifisering av den norske jernbanen, og resultatene kan derfor være mer representative enn de gamle resultatene
- Den nye studien har benyttet aggregeringsvekter på bakgrunn av en forundersøkelse, mens den gamle studien baserte analysen primært på trafikk langs hovedbanen (men med en kalibrering mot Statistisk Sentralbyrås nasjonale støykartlegging).
- Verdsettingen av støy avviker mellom de to studiene
- Beregningen av marginal støyendring er forskjellig mellom de to studiene

Vi beskriver i det følgende noen av disse trekkene i mer detalj.

Valg av aggregeringsvekter

Siden vi bruker total trafikk som et kriterium for utvelgelse av strata til analysen, mener vi at andelen av togkilometer per strata utgjør et naturlig valg av aggregeringsvekt. I Rødseth mfl. (2019) vektet derimot strekningscasene med antall eksponerte per banestrekning. Det kan innebære at caser med mange eksponerte får høy vekt i denne analysen (selv om det teoretisk sett kan være få slike strekninger i landet).

Tabell 5.8 viser estimerte marginale støykostnader dersom vi legger antall person per strekning til grunn som vektungskriterium, i stedet for den relative andelen av togtrafikken per utvalgt strata. Ved å sammenlikne med tabell 5.6 ser vi at den alternative vektingen ikke dramatisk endrer det overordnede kostnadsnivået i beregningene, og dermed ikke kan forklare det overordnede avviket mellom de gamle og nye beregningene. Derimot bidrar den alternative vektingen til at noen av de relative kostnadsforskjellene mellom tettstedstyper og tid på døgnet endres. Eksempelvis øker kostnaden for ett ekstra persontog på natten utenfor tettsted. Kostnaden ved ett ekstra godstog på natten reduseres i små tettsteder, men øker markant i store tettsteder.

Tabell 5.8: Sammenlikning av marginale støykostnader (MK) i 2023-kroner når andelen støyutsatte personer brukes til å aggregere til populasjonsnivået.

Type	Døgn	MK Utenfor tettsted	MK Lite tettsted	MK Stort tettsted
Gods	Dag	.	.0,5	2,7
Gods	Kveld	1,1	1,9	12,7
Gods	Natt	19,8	30,3	155,3
Person	Dag	0,0	0,0	0,0
Person	Kveld	0,0	0,0	0,0
Person	Natt	4,0	0,4	1,1

Verdsetting av støy

I Rødseth mfl. (2019) ble svak støyplage verdsatt i tillegg til helseutfallene søvnforstyrrelser og sterk støyplage, basert på resultater fra en tidligere spørreundersøkelse. I denne studien ser vi bort fra svak støyplage, og forholder oss kun til helseutfall som er verdsatt i form av DALY, dvs. sterk grad av søvnforstyrrelser og sterk støyplage. En annen viktig forskjell er også at Rødseth mfl. (2019) ikke gjorde noen justering for overlapp mellom sterk støyplage, mens dette er gjort i den nye studien.

Vi gjør en test for basisscenarioet til den utvalgte strekningen Hauketo-Holmlia. Tabell 5.9 sammenstiller enhetsprisene og antall personer som eksponeres for støy over 53 dB. Ved å gange enhetspriser og antall personer sammen innen hvert av de 3 intervallene og å summere over de finner vi en total årlig kostnad for en dB endring lik 2 millioner. Det tilsvarer en kostnad på kr 1 240 per støyutsatt person. Til sammenlikning viser de nye beregningene en samlet kostnad på 23 millioner, m.a.o. 11 ganger høyere

enn den tidligere verdsettingen. Avviket skyldes i) både at de nye beregningene ikke antar en cut-off på 53 dB (men regner også med personer som eksponeres for et lavere dB-nivå enn 53), og ii) at kostnadene per person er høyere i den nye studien: Totalt inngår 5 587 personer i beregningsgrunnlaget til den nye studien, mens kostnaden per person er 3 966 kr.

Tabell 5.9: Enhetspris per dB og person og antall støyutsatte personer for strekningen Hauketo-Holmlia.

Variabel	53-56 dB	57-64 dB	65dB +
Enhetspris (2019-kr/dB)	279	2148	2534
Antall støyutsatte personer	810	791	47

6 Infrastrukturslitasje fra togtransport – vedlikeholdskostnader

6.1 Skadekostnader ved transport

Dette kapitlet beskriver vår gjennomgang av hvordan bruken av jernbaneinfrastrukturen påfører slitasje, som igjen driver opp de daglige vedlikeholdskostnadene. Dette resulterer i beregninger av marginale, trafikkavhengige kostnader for vedlikehold, dvs. hvordan en marginal økning i trafikkarbeid på jernbaneinfrastrukturen driver opp vedlikeholdskostnadene. Vi presenterer utvalgte resultater i dette kapitlet, mens modellspesifikasjoner vi har testet og vurderer som mindre relevante for beregningen av marginale kostnader presenteres i Appendikset.

Vi legger til grunn tre rettesnorer når vi skal velge modellspesifikasjon til beregning av marginale slitasjekostnader knyttet til vedlikehold

- i. Produksjonsteori og valg av funksjonsformer for kostnadsfunksjonen i produksjonsanalytelitteraturen
- ii. Modellspesifikasjoner brukt i tidligere studier
- iii. Kunnskap om fysiske sammenhenger mellom togenes egenskaper og deres slitasje på jernbanen

Det neste kapitlet beskriver teori om kostnadsfunksjonsestimering og eksempler på empirisk implementering i tidligere studier, mens kapittel 6.3 beskriver datasettet vi benytter til vår egen estimering. Vi presenterer de mest sentrale funnene fra den empiriske studien i kapittel 6.4, mens kapittel 6.5 konkluderer og gir anbefalinger av hvilke estimater som kan brukes til videre analyse. Appendikset oppsummerer andre beregninger som er vurdert som mindre relevant for beregning av marginale slitasjekostnader.

6.2 Metodevalg

Vi definerer de rapporterte årlige kostnadene ved vedlikehold $c \in \mathcal{R}_+$ som en funksjon av produktene $\mathbf{y} \in \mathcal{R}_+^M$ og kontekstuelle faktorer $\mathbf{z} \in \mathcal{R}_+^K$. Med produkter mener vi her hovedsakelig størrelsen på infrastrukturen og trafikkmengder, hvor jernbaneøkonomi ofte skiller mellom tetthetsøkonomi (dvs. økonomiske fordeler ved en høyere trafikkintensitet for et gitt jernbanenettverk) og skalaøkonomi (dvs. økonomiske fordeler ved å utvide tognettverket). Kontekstuelle faktorer omhandler primært attributter ved jernbanen eller togene som betjener den.

Vi antar som utgangspunkt at produktene og kontekstuelle faktorer er *separable* (noe som er hensiktsmessig fordi vi i flere tilfeller ønsker å modellere produktene i større detalj enn kontekstuelle faktorer). En generell beskrivelse av kostnadsfunksjonen er da gitt ved:

$$c = g(\mathbf{y})e^{h(\mathbf{z})} \quad [1]$$

Denne funksjonen er ikke-lineær, og det er derfor naturlig å ta logaritmen av funksjonen²⁴ for å få en lineær funksjon til bruk til estimering ved minste kvadrats metode.

²⁴ En kjent egenskap ved kostnadsfunksjonen er at den er *homogen* i faktorpriser. Färe og Sung (1986) viser at funksjonsformen kalt *Translog* er et attraktivt valg i dette tilfellet. Denne funksjonsformen spesifiserer variablene i

$$\ln c = \ln g(\mathbf{y}) + h(\mathbf{z}) + \epsilon \quad [2]$$

hvor ϵ er et restledd til bruk i regresjonsmodellen.

Vi kan estimere $g(\mathbf{y})$ både *parametrisk* og *ikke-parametrisk*. En parametrisk modell søker å beskrive kostnadsfunksjonen som passer dataene best, forutsatt at forskeren har valgt en *funksjonsform* i forkant av estimeringen. Gitt valget om å benytte en *log-log*-spesifikasjon for kostnadsmodellen (jf., fotnote 1), er det i hovedsak to kjente funksjonsformer som er aktuelle for analysene:

a. *Cobb-Douglas*

b. *Translog*

Cobb-Douglas-funksjonen er matematisk definert av likning 3, hvor indeksen i henviser til en observasjonssenheter i datasettet vårt.

$$\ln c_i = \beta_0 + \sum_m \beta_m \ln y_{im} + \sum_k \delta_k z_{ik} + \epsilon_i \quad [3]$$

Translog-funksjonen utvider Cobb-Douglas-funksjonen med både kvadrat- og interaksjonsledd:

$$\begin{aligned} \ln c_i = \beta_0 + \sum_m \beta_m \ln y_{im} + 0.5 \sum_m \sum_n \beta_{mn} \ln y_{im} \ln y_{in} \\ + \sum_k \delta_k z_{ik} + \epsilon_i \end{aligned} \quad [4]$$

hvor $\beta_{mn} = \beta_{nm}$ (symmetri).

Ved å derivere kostnadsfunksjonen med hensyn til y_{im} , kan vi beregne *kostnadselastisiteten* til produkt m for enhet i . Eksempelvis kan denne vise *prosentvis endring* i vedlikeholdskostnader ved *en prosent* endring i totale tonnkilometer på Dovrebanen.

Økonomisk produksjonsteori er tuftet på aksiomer, som legger føringer på estimeringen av funksjonene og deres egenskaper. Blant de viktigste egenskapene er *monotonitet*²⁵, som innebærer at kostnadselastisiteten skal være *ikke-negativ*. Det innebærer at vi i utgangspunktet vil forkaste modellspesifikasjoner og/eller resultater som indikerer at vedlikeholdskostnadene faller dersom trafikken øker. Vi anser dette som en test på egnethet av modellspesifikasjonen.

kostnadsfunksjonen i logaritmer, og vi anser derfor en *log-log*-spesifikasjon som et naturlig valg for estimeringen av kostnadsfunksjonen. Dette er også det vanligste valget i empiriske kostnadsfunksjonsstudier.

²⁵ En annen viktig egenskap er *kurvatur*: En kostnadsfunksjon skal i teorien være konkav i faktorpriser, og antas ofte å være konveks i produkter (avtakende skalautbytte). Dette er egenskaper som automatisk oppfylles av ikke-parametriske metoder, men som ikke behøver å holde empirisk for parametriske modeller. Ofte neglisjeres kurvaturegenskaper i studier som bruker parametrisk estimering, og i tilfeller hvor det tas hensyn til brukes gjerne tester for å vurdere om den estimerte funksjonen har egnede egenskaper. En vanlig test er å kontrollere om Hessematrisen er negativ semidefinit ved konkavitet i faktorpriser. Siden vi ikke har faktorpriser med i analysen, ser vi bort fra kurvaturegenskaper i dette studiet. Se f.eks. Rødseth mfl. (2024) for mer diskusjon om empirisk estimering av funksjoner innen produksjonsanalyse.

La $\hat{c}_i$ vise til den *estimerte* kostnadsfunksjonen til enhet i , dvs. estimerte kostnader for bane i etter at funksjonens parametre har blitt bestemt gjennom bruk av regresjonsanalyse. Kostnadselastisiteten til produkt m kan da formelt defineres som:

$$\frac{\partial \ln \hat{c}_i}{\partial \ln y_{im}} = \frac{\partial \hat{c}_i}{\partial y_{im}} \frac{y_{im}}{\hat{c}_i} \quad [5]$$

Ved å skrive om dette uttrykket finner vi en formel for *marginale kostnader*, definert som produktet av kostnadselastisiteten og gjennomsnittlige kostnader for produkt m .

$$\frac{\partial \hat{c}_i}{\partial y_{im}} = \frac{\partial \ln \hat{c}_i}{\partial \ln y_{im}} \frac{\hat{c}_i}{y_{im}} \quad [6]$$

Merk at dette uttrykket benytter predikerte kostnader, $\hat{c}_i$, til å beregne marginale kostnader. Predikerte kostnader fremkommer her ved å gange de estimerte modellparametrene med variablene i kostnadsmodellen for å beregne forventede kostnader. Eksempelvis vil predikerte kostnader for en Cobb-Douglasfunksjon (jf. likning 3) beregnes som $\hat{c}_i = \exp(\hat{\beta}_0 + \sum_m \hat{\beta}_m \ln y_{im} + \sum_k \hat{\delta}_k z_{ik})$, hvor «hattene» indikerer at parameterne er estimert i forkant av prediksjonen av totale kostnader.

En fordel ved å benytte $\hat{c}_i$ i beregningen av marginale kostnader – heller enn faktiske kostnader – er at de estimerte kostnadene vil avhenge av alle variablene som inngår i modellspesifikasjonen. Forskjeller mellom baner mtp. ulike attributter det kontrolleres vil derfor fremgå. Til sammenlikning vil faktiske kostnader ha større variasjon mellom banene, og kan påvirkes av eksempelvis stokastiske hendelser eller geografiske forskjeller. Dette er forhold som vi anser å være av liten relevans i beregningen av en generisk, trafikkavhengig marginalkostnad for daglig vedlikehold.

6.2.1 Single-indeks estimering av Cobb-Douglas-funksjonen

I modellbeskrivelsene ovenfor har vi antatt at kontekstuelle faktorer – som f.eks. antall sporvekslere eller bruer og tunneler langs banen – påvirker kostnadsnivået, men ikke selve formen på kostnadsfunksjonen. Dette virker rimelig dersom man skal vurdere forhold ved sporet, men det gir mindre fleksibilitet dersom man skal ta hensyn til forhold ved selve togtransporten, som bl.a. togenes akselvekt og hastighet. De sistnevnte attributtene er heller ikke naturlig å modellere som egne produkter i kostnadsfunksjonen, og vi søker derfor en alternativ metode til å inkludere disse attributtene.

For å gi muligheter til å vurdere påvirkningen av akselvekt og hastighet individuelt for person- og godstog foreslår vi en ny spesifikasjon av en Cobb-Douglas kostnadsfunksjon gjennom å bruke en såkalt *single-indeks* modell. Dette innebærer at kostnadsfunksjonens parametre er en funksjon av flere andre variabler. Konkret foreslår vi å bruke funksjonen:

$$c_i = \prod_m y_{im}^{\beta_m + \sum_k \delta_{km} z_{ikm}} e^{\beta_0 + \epsilon_i} \quad [7]$$

Vi lineariserer funksjonen ved logaritmetransformasjon, og finner ønsket regresjonslikning:

$$\ln c_i = \beta_0 + \sum_m \beta_m \ln y_{im} + \sum_m \sum_k \delta_{km} z_{ikm} \ln y_{im} + \epsilon_i \quad [8]$$

Dette gir en funksjonsform som begrenser antallet modellparametre som behøves å estimeres, men som samtidig gjør det mulig å skille mellom hvordan vekt- og hastighetsattributter ved person og godstransport påvirker slitasjekostnadene: Disse variablene interagerer her med produktene i kostnadsfunksjonen. Dette gir større fleksibilitet i modelleringen av skillet mellom marginalkostnader for person- og godstrafikk.

6.2.2 Referansestudier

Det er hensiktsmessig å ta utgangspunkt i etablerte studier, for å kunne sammenlikne våre egne resultater mot disse studiene – både når det gjelder modellspesifikasjon og resultater. Merk at spesifikasjonene er anvendt på paneldata, og bruker derfor både en indeks for enhet i og periode t .

Den første referansestudien vi vil trekke fram er Johansson og Nilsson (2004), som internasjonalt kan sees som pionerstudien innen estimering av marginalkostnader ved daglig vedlikehold. Denne studien tar utgangspunkt i modellspesifikasjonen gitt av likning 2, hvor kostnadsfunksjonen er antatt å være *translog* (jf. likning 4). Johansson og Nilsson (2004) inkluderer bruttotonnkilometer og strekingskilometer (sporlengde) som produkter i kostnadsfunksjonen, mens antall sporvekslere, hastighet og en dummy for elektrifisering brukes som kontekstuelle variabler. En konkret beskrivelse av modellspesifikasjonen er som følger:

$$\begin{aligned} \ln c_{it} = & \alpha + \alpha_t + \beta_1 \text{IkkeEl}_{it} + \beta_2 \ln \text{KmBane}_{it} + \beta_3 \ln \text{BruttoTonnkm}_{it} + \\ & \beta_4 \ln \text{KmBane}_{it}^2 + \beta_5 \ln \text{BruttoTonnkm}_{it}^2 + \beta_6 \ln \text{KmBane}_{it} \ln \text{BruttoTonnkm}_{it} + \\ & \beta_7 \text{AntallSporveksler}_{it} + \beta_8 \text{AntallSporveksler}_{it}^2 + \beta_9 \text{Hastighet}_{it} \\ & + \beta_{10} \text{Hastighet}_{it}^2 + \varepsilon_{it} \end{aligned} \quad [9]$$

En annen studie vi ønsker å trekke fram er Bane NORs (2023) beregning av kjøreveisavgiften. Beregningen tar utgangspunkt i samme datasett som benyttes i vår studie. Bane NOR benytter en modellspesifikasjon lik den definert av likning 8, hvor interaksjoner mellom produktet *antall tog* og regionsdummier for Osloområdet og Ofofbanen inkluderes i spesifikasjonen.

$$\begin{aligned} \ln c_{it} = & \alpha + \beta_1 \ln \text{KmBane}_{it} + \beta_2 \ln \text{AntallTog}_{it} + \\ & \beta_3 \text{Osloområdet}_i * \ln \text{AntallTog}_{it} + \\ & \beta_4 \text{Ofofbanen}_i * \ln \text{AntallTog}_{it} + \varepsilon_{it} \end{aligned} \quad [10]$$

En viktig bemerkning er at Bane NOR beregner marginale kostnader ved å

- i) Estimere kostnadselastisiteten $\hat{\beta}_2 + \hat{\beta}_3 \text{Osloområdet}_i + \hat{\beta}_4 \text{Ofofbanen}_i$ ved bruk av minste kvadrats metode
- ii) Estimere marginale kostnader ved å gange kostnadselastisiteten med den *observerte* gjennomsnittskostnaden per område

Til punkt ii) beregnes gjennomsnittskostnaden per område (dvs. for Osloområdet, Ofofbanen og resten) ved å dele totale, faktiske vedlikeholdskostnader per område på deres respektive antall togkilometere for et referanseår. Denne praksisen avviker derfor fra praksisen definert i likning 6, hvor *predikerte* kostnader benyttes til å beregne *gjennomsnittskostnaden* per observasjonsenhet i datasettet. En ulempe med Bane NORs tilnærming er at den skjuler heterogenitet i marginale kostnader mellom ulike baner og år, samt at hindrer at bidraget til de andre variablene i kostnadsmodellen – ut over togkilometer – spiller en rolle for beregningen av marginalkostnadene: I tilfellet hvor predikerte kostnader brukes til beregningen av marginalkostnader vil naturligvis alle variablene i kostnadsmodellen påvirke gjennomsnittskostnadene og dermed marginale kostnader. Samtidig kan disse variere over baner og år. Vi ønsker derfor å bruke predikerte kostnader i beregningen av marginale kostnader for daglig vedlikehold.

Vi bemerker også at modellspesifikasjonen til Bane NOR ikke vektlegger togenes aksellast og hastigheter i beregningene av marginale slitasjekostnader. Vi forventer at disse faktorene er av betydning for slitasjekostnadene, og fraværet av disse attributtene i kostnadsmodellen kan følgelig være en svakhet ved modellspesifikasjonen til Bane NOR. Vi vil komme tilbake til disse attributtene i de videre analysene.

6.2.3 Teoretiske forutsetninger

I Bane NORs modell brukes det dummier til å forklare variasjoner i vedlikeholdskostnader mellom geografiske områder. Selv om dette kan være nyttig til geografisk differensiering av kjøreveisavgiften, mener vi at bruken av konkrete geografiske dummier i utgangspunktet ikke er ønskelig i beregningen av en *generisk* kostnadsmodell for vedlikehold. Målet er å si noe generelt om kostnadsnivået og dets sammenheng med trafikk, ikke å identifisere konkrete geografiske forskjeller i vedlikeholdskostnader.

I tråd med Johansson og Nilsson (2004) har en rekke empiriske studier forsøkt å forklare kostnadseffekten av attributter ved jernbanen, slik som antall bruer, tunneler og sporvekslere. Selv om slike forhold kan være av relevans for det overordnede kostnadsnivået, tilsier ingeniørkunnskap at det er egenskaper ved togene og måten trafikken utføres på – både når det gjelder akselvekt²⁶ og hastighet – som er av spesiell betydning for de trafikkavhengige kostnadene. Vi vil derfor fokuseres på disse attributtene i analysene. I så måte er det et naturlig skille mellom person- og godstog, hvor det sistnevnte typisk har høyere akselvekt, men lavere hastighet enn persontog.

Vi bør også bemerke at vi – bl.a. grunnet datatilgjengelighet – følger Bane NOR og kun legger til grunn *vedlikeholdskostnader* i beregningene av marginale slitasjekostnader. Bane NOR (2023) bemerker selv at andre land har inkludert kostnader til fornying, avskrivninger, ruteplanlegging og trafikkstyring i sine beregninger av direkte kostnader. Fornyingskostnadene behandles i kapittel 7, mens kostnader til ruteplanlegging og trafikkstyring ikke inngår. Bane NOR (2023) kommenterer selv at fornyelses- og avskrivningskostnadene trolig påvirkes i større grad av trafikken.

6.3 Data

Analysen bygger på samme datasett som ble benyttet i Bane NOR (2023), men Bane NOR har i forbindelse med vårt arbeid utvidet dataserien fra 2017-2021 til 2017-2024. Datasettet er et ubalansert panel med 27 baner og 208 observasjoner totalt.

Dataene er beskrevet inngående i Bane NOR (2023), og vi gjengir derfor kun de viktigste momentene her.

Kostnader: Det er forebyggende og korrektivt vedlikehold som inngår i vedlikeholdskostnadene. Dataene er hentet fra Bane NORs regnskapssystem. Kostnadselementer som finanskostnader og overhead-kostnader inngår ikke i kostnadstallene.

Tekniske data: De tekniske dataene er hentet fra TRASÉ. Dataene er fordelt på banestrekninger.

Trafikkdata: Produksjonsvolumet er målt gjennom faktisk kjørte brutto tonnkilometer, togkilometer og gjennomsnittlig vekt registrert i TIOS og DRAGE totalt og for henholdsvis persontog, godstog og andre

²⁶ I Network Statement 2025 differensierer Bane NOR grunnprisen per togkilometer etter aksellast, med et skille på under/over 25 tonn per aksel. Grunnprisen tar utgangspunkt i regresjonsmodellen i likning 10, og benytter estimert pris per togkilometer (beregnet for alle regioner utenom Osloområdet og Ofofbanen) ganget med antall togkilometer med lav aksellast på Ofofbanen til å beregne totale vedlikeholdskostnader for tog med lav aksellast på Ofofbanen. Disse kostnadene trekkes deretter fra estimerte kostnader for alle tog på Ofofbanen (estimert med likning 10) for å anslå kostnader til togtrafikk med høy aksellast. Kostnadene deles deretter på antall togkilometer for å finne kostnaden per kilometer.

Bane NOR tar ikke direkte hensyn til aksellast i modellen sin, men forsøker å belyse effekten av aksellast indirekte gjennom å anslå fordelingen av slitasjekostnader mellom tog med høy og lav akselvekt. Vi oppfatter dette som utilstrekkelig til å belyse forskjeller mellom togenes vekt, ettersom metoden ikke bygger på statistisk analyse og testing. Vi vil derfor i fortsettelsen konsentrere oss om spesifiseringer av kostnadsmodellen som gjør det mulig å differensiere mellom attributter som togenes vekt og hastighet.

tog. Bane NOR har også tilgang til data på gjennomsnittlig faktisk aksellast per bane i 2020. Alle variablene er fordelt på banestrekning.

Prisindeks: Kostnadene justeres med Statistisk Sentralbyrås prisindeks for drift og vedlikehold av veger.

En oppsummering av variablene i datasettet er gitt av tabell 6.1.

Tabell 6.1: Beskrivelse av variablene i datasettet til beregning av marginale kostnader for vedlikehold. Kilde: Bane NOR.

Variabel	Enhet
Kostnadsdata	
Vedlikeholdskostnader	I kroner
Tekniske data	
Banelengde	Km med spor
Bruer	Konstruksjonslengde
Sporveksler	Antall
Tuneller	Konstruksjonslengde
Plattformer	Konstruksjonslengde
Kurvatur	Gjennomsnittlig kurvatur < 300 meters radius
Elektrifisering	Dummy for elektrifisert eller ikke
Skiltet hastighet	Gjennomsnittlig tillatt km/t
Faktisk aksellast	Informasjonen er tilgjengelig for alle baner utenom Arendalsbanen, Flåmsbanen, Follobanen, Meråkerbanen og Spikkestadbanen.
Faktisk hastighet	Informasjonen er tilgjengelig for alle baner utenom Arendalsbanen, Flåmsbanen, Follobanen, Meråkerbanen og Spikkestadbanen.
Trafikkdata	
Antall avganger	
Brutto tonn	
Aksellast	Gjennomsnitt per banestrekning
Prisindeks og tidstrend	
SSBs prisindeks for drift og vedlikehold av veger	
Tidstrend	

6.4 Resultater

Vi presenterer innledningsvis referanserresultater gjennom å implementere Bane NORs (2023) metodeopplegg, før vi presenterer våre foretrukne modellspesifikasjoner. Vi vil – i likhet med Bane NOR – fokusere på en kostnadsfunksjon på Cobb-Douglas-formen, hvor togkilometer benyttes som trafikkvariabel. I Appendikset viser vi at den fleksible Translog-modellen og bruk av tonnkilometer som trafikkvariabel kan lede til negative kostnadselastisiteter, noe som gjør resultatene uegnet til bruk for analyse av marginale skadekostnader.

6.4.1 Referanseberegning

Siden vårt datasett er blitt utvidet med flere observasjoner siden Bane NORs studie, ønsker vi innledningsvis å replikere deres studie med de nye dataene. Resultatene er gjengitt i tabell 6.2, hvor det er viktig å bemerke at Bane NOR har brukt «antall tog» i stedet for «togkilometer» som trafikkvariabel. Dette skyldes at Bane NOR beregner «togkilometer» ved å gange «kilometer med spor» med «antall tog», slik at kostnadselastisiteten vil være upåvirket av om man bruker antall tog eller togkilometer som trafikkvariabel.

Tabell 6.2: Regresjonsresultater for basismodellen (Bane NOR (2023) sin modellspesifikasjon).

	InFastkostvedlikehold2021kr
InKilometermedspor	0,901*** (0,028)
InAntalltog	0,188*** (0,043)
Ofofbanen* InAntalltog	0,115*** (0,022)
Osloområdet* InAntalltog	0,040*** (0,012)
Konstantledd	11,662*** (0,339)
R ²	0,870
N	208,000

* p<0.10, ** p<0.05, *** p<0.01

Vi viser til likning 6 for en formell beskrivelse av hvordan marginale kostnader predikeres basert på estimerte kostnadselastisiteter, ved å gange kostnadselastisiteten med predikerte gjennomsnittlige vedlikeholdskostnader per observasjonsenhet. I hht. tabell 6.2, beregnes kostnadselastisiteten for modellspesifikasjonen fra Bane NOR (2023) som $0,188 + 0,115 \cdot \text{Ofofbanen} + 0,040 \cdot \text{Osloområdet}$, hvor Ofofbanen (Osloområdet) er en dummy-variabel som tar verdien 1 dersom vi vurderer Ofofbanen (Osloområdet), og 0 ellers.

Som diskutert tidligere, avviker Bane NORs praksis fra den beskrevet av likning 6, ved at de erstatter predikerte gjennomsnittskostnader per observasjonsenhet med observerte gjennomsnittskostnader per område (dvs. for Ofofbanen, Osloområdet og resten av jernbanenettet). Gjennomsnittskostnadene som legges til grunn i Bane NOR (2023) er 168,6 kr/togkm for Ofofbanen, 22,8 kr/togkm for Osloområdet og 51 kr/togkm for resten av jernbanen. Beregnede marginale kostnader blir da $(0,188 + 0,115) \times 168,6 = 51,1$ kroner for Ofofbanen, $(0,188 + 0,040) \times 22,8 = 5,2$ kroner for Osloområdet og $0,188 \times 51 = 9,6$ kroner per kilometer for resten av jernbanen.

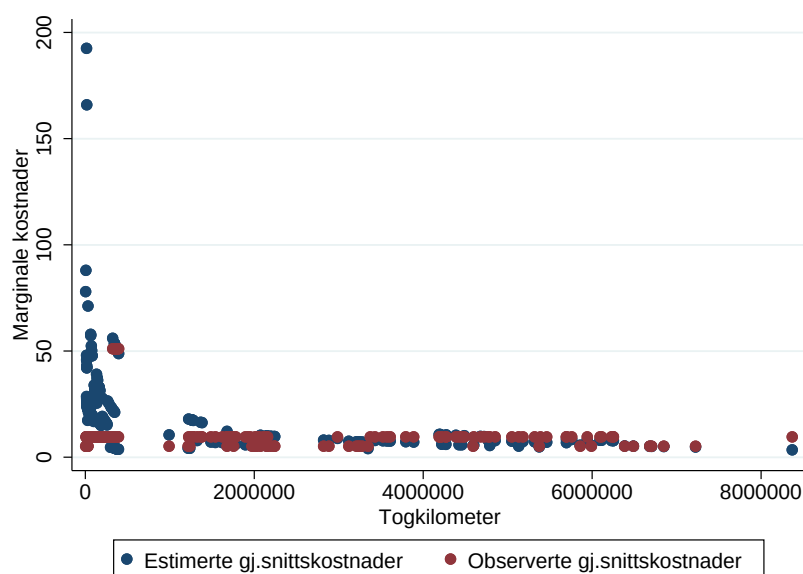
Til sammenlikning ønsker vi å rapportere marginale kostnader dersom de *predikerte* kostnadene fra estimeringen legges til grunn for beregningen av marginalkostnadene. Tabell 6.3 viser at Bane NORs bruk av observerte gjennomsnittskostnader leder til betydelig lavere marginale kostnader enn dersom

predikerte gjennomsnittskostnader legges til grunn (som eksempelvis gjort i Johansson og Nilsson, 2004).

Tabell 6.3: Sammenliknende statistikk av marginale kostnader (2021 NOK) når gjennomsnittskostnadene beregnes med observerte (Bane NOR) eller predikerte kostnader.

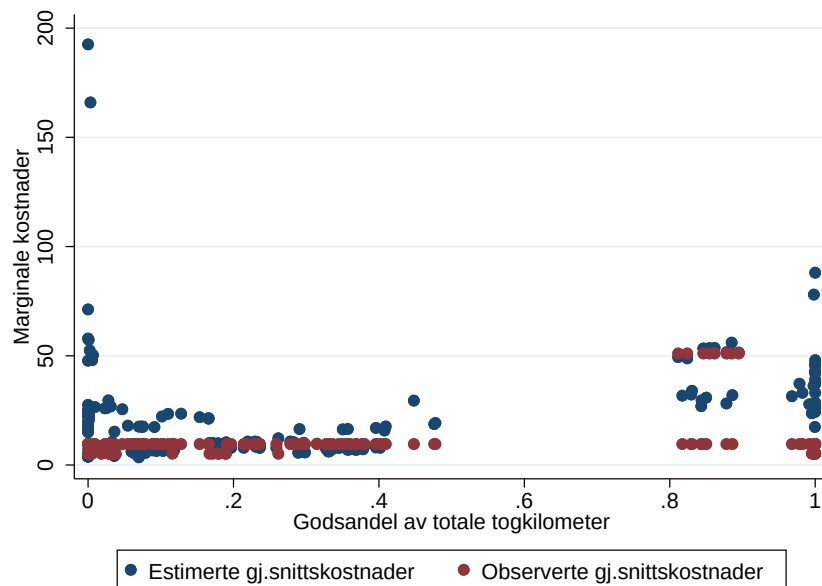
	N	Gj.snitt	St.avvik	Min	Maks
Estimerte gj.snittskostnader	208	10,3	8,4	5,2	51,1
Observerte gj.snittskostnader	208	20,0	22,2	3,5	192,6

Figur 6.1 viser beregnede marginale kostnader etter trafikkmengde. Den illustrerer at avviket mellom de to metodene sammenstilt i Tabell 6.3 – dvs. ved bruk av faktiske eller estimerte gjennomsnittskostnader til beregningen av marginale kostnader – først og fremst gjør seg gjeldende for baner med lav trafikk.



Figur 6.1: Sammenlikning av marginale slitasjekostnader (2021 NOK) beregnet med hhv. estimerte og observerte gjennomsnittlige kostnader og Bane NORs modellspesifikasjon, etter totale togkilometer per bane og år.

Figur 6.2 sammenlikner de to metodene etter andel togkilometer med godstog. Den illustrerer at selv om vi *a priori* kan forvente en systematisk forskjell i slitasjekostnader knyttet til gods- og persontog grunnet deres ulikheter i hastighet og akselvekt, fanges ikke dette opp av basisspesifikasjonen. Vi søker derfor andre modellspesifiseringer som gjør det mulig å ta hensyn til disse forskjellene.



Figur 6.2: Sammenlikning av marginale slitasjekostnader (2021 NOK) beregnet med hhv. estimerte og observerte gjennomsnittlige kostnader og Bane NORs modellspesifikasjon, etter andel togkilometer med godstog per bane og år.

6.4.2 Kontroller for skillet mellom person og godstog

Vi vurderer at det i praksis er to mulige tilnærminger for å kontrollere for ulikhet i slitasje grunnet forskjeller i akselvekt og togenes hastighet. Den første tilnærmingen er å kontrollere for antall togkilometer med gods- og persontrafikk, mens den andre er å inkludere attributtene vekt og hastighet direkte i modellen som skal estimeres. I dette delkapitlet fokuserer vi på den første tilnærmingen.

Tabell 6.4 beskriver regresjonsresultatene for modellene:

K1: togkilometer med hhv. gods- og persontog inngår som individuelle produkter i kostnadsfunksjonen

K2: totale togkilometer inngår i kostnadsfunksjonen, mens godsandel (andel av togkilometer med godstog, relativt til totale togkilometer per bane og år) inngår som kontekstuell variabel

Tabell 6.4: Regresjonsresultater for modellspesifikasjoner som skiller mellom togkilometer med person og godstog.

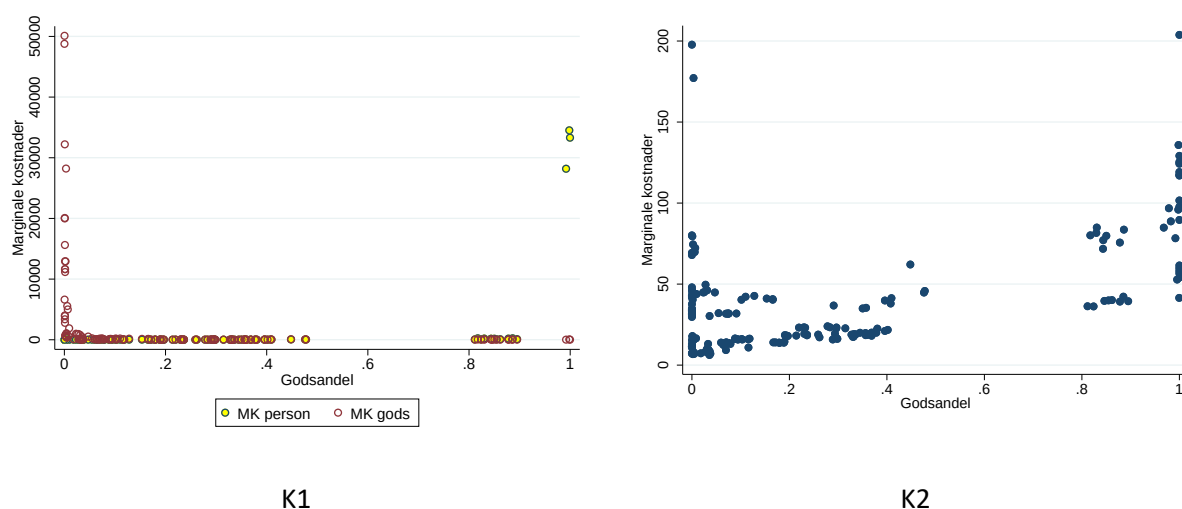
	(K1) lnFastkostvedlikehold2021kr	(K2) lnFastkostvedlikehold2021kr
lnTogkmgods	0,145*** (0,019)	
lnTogkmperson	0,101*** (0,027)	
lnKilometermedspor	0,502*** (0,066)	0,498*** (0,048)
lnTogkm		0,389*** (0,037)
GodsAndel		0,545*** (0,117)
Konstantledd	12,510*** (0,252)	9,954*** (0,355)
R ²	0,816	0,865
N	156,000	208.000

* p<0,10, ** p<0,05, *** p<0,01

Tabell 6.5 gir sammenliknende statistikk for marginalkostnadene beregnet ved de to modellene, hvor modell K1 gir mulighet til skille mellom marginale kostnader for gods og persontog. Denne viser tydelig at å skille mellom person- og godstog i modellspesifikasjonen leder til uønskede resultater som følge av at marginalkostnadene i snitt blir urealistisk høye. Forklaringen til dette fenomenet fremgår av figur 6.3, som visualiserer de estimerte marginalkostnadene etter godsandel: Det er i tilfellene hvor godsandelen (personandelen) er tilnærmet 0 at marginale kostnader for et godstog (persontog) blir urealistiske. Samtidig viser modellspesifikasjon K1 liten grad av korrelasjon mellom godsandel og marginale slitasjekostnader. Vi vurderer derfor K2 til å være en mer egnet modell, som også indikerer at marginalkostnadene øker i andelen godstrafikk. Men også denne modellspesifikasjonen har uteliggere mtp. når beregnede marginalkostnader når godsandelen er tilnærmet 0 eller 1.

Tabell 6.5: Sammenliknende statistikk av marginale kostnader i modellene med i) individuelle kostnadselastisiteter for gods og persontog og ii) modellen med godsandel.

	N	Gj.snitt	St.avvik	Min	Maks
MK person, K1	156	636,9	4 422,6	1,0	34 513,7
MK gods, K1	156	2 094,6	7 174,6	11,4	50 099,4
MK (v/godsandel), K2	208	37,2	33,6	6,2	203,8



Figur 6.3: Beregnede marginale kostnader (MK) for person og godstransport beregnet ved modellene K1 og K2, etter andel togkilometer utført av godstog.

6.4.3 Kontroll for akselvekt og hastighet

Akselvekt og hastighet er ikke naturlige mål på trafikkarbeid, og har derfor ingen naturlig plass som et produkt i kostnadsfunksjonen (jf. delkapittel 6.2.1). Samtidig forventer vi at interaksjonen mellom trafikkmengde og disse attributtene vil være av betydning for slitasjen. Vi behandler derfor akselvekt og hastighet i en singel-indeksmodell (jf. likning 8). Vi vurderer tre ulike modeller

M1: Denne modellen har togkilometer med hhv. gods og persontransport som separate produkter i kostnadsfunksjonen, i tillegg til deres interaksjoner med hhv. faktisk aksellast og snitthastighet for hhv. gods og persontog

M2: Denne modellen har totale togkilometer i kostnadsfunksjonen, mens målene for faktisk aksellast og snitthastighet for hhv. person- og godstog inngår som en vektet sum, hvor vektene er $\ln \text{TogkilometerTotalt} / \ln \text{TogkilometerPerson}$ og $\ln \text{TogkilometerTotalt} / \ln \text{TogkilometerGods}$

M3: Denne modellen har totale togkilometer i kostnadsfunksjonen, i tillegg til interaksjoner mellom togkilometer og hhv. vektet aksellast og vektet hastighet

Regresjonsresultatene er presentert av

tabell 6.6. Vi viser til Faktaboksen for en definisjon av variablene som inngår i de ulike modellspesifikasjonene.

Faktaboks: Spesifikasjon av variabler til analysene

LastPerson	= Aksellastpersonfaktisk * lnTogkmperson
LastGods	= Aksellastgodsfaktisk * lnTogkmgods
HastighetPerson	= Hastighetsnittperson * lnTogkmperson
HastighetGods	= Hastighetsnittgods * lnTogkmgods
LastSum	= Vektetaksellast * lnTogkm
HastighetSum	= Vektethastighet * lnTogkm
LastSumPerson	= Aksellastpersonfaktisk * ((lnTogkmperson/lnTogkm) ⁻¹)
LastSumGods	= Aksellastgodsfaktisk * ((lnTogkmgods/lnTogkm) ⁻¹)
HastighetSumPerson	= Hastighetsnittperson * ((lnTogkmperson/lnTogkm) ⁻¹)
HastighetSumGods	= Hastighetsnittgods * ((lnTogkmgods/lnTogkm) ⁻¹)

Tabell 6.6: Regresjonsresultater for modeller som kontrollerer for variasjoner i togenes vekt og hastighet.

	(M1) lnFastkostvedlikehold 2021kr	(M2) lnFastkostvedlikehold 2021kr	(M3) lnFastkostvedlikehold 2021kr
lnTogkmperson	0.140*** (0.042)		
lnTogkmgods	-0.156*** (0.055)		
lnKilometermedspor	0.607*** (0.059)	0.461*** (0.065)	0.554*** (0.049)
LastPerson	0.001 (0.001)		
LastGods	0.017*** (0.002)		
HastighetPerson	-0.000 (0.000)		
HastighetGods	0.000 (0.000)		
lnTogkm		0.460*** (0.050)	0.225*** (0.074)
LastSumPerson		0.035** (0.015)	
LastSumGods		0.024* (0.013)	
HastighetSumPerson		-0.006*** (0.002)	
HastighetSumGods		-0.009*** (0.003)	
LastSum			0.008*** (0.002)
HastighetSum			-0.000** (0.000)
Konstantledd	11.884*** (0.338)	9.753*** (0.488)	10.918*** (0.464)
R ²	0.908	0.891	0.869
N	148	148	205

* p<0.10, ** p<0.05, *** p<0.01

Vi må først bemerke at grunnet i) manglende informasjon om faktisk vekt og hastighet for gods- og persontog for alle år samt at ii) variablene knyttet til godstog (persontog) ikke er definert når godstog-andelen (persontogandel) er 0 blir modellene M1 og M2 tilpasset på et datasett med bare 148 datapunkter, mens modell M3 (som bruker vektet aksellast og hastighet) kan føyes til et datasett med 205 observasjoner. Videre bør det pekes ut at alle modellene konsistent finner en i) positiv sammenheng mellom interaksjonsvariabler for vekt og driftskostnader og ii) negativ sammenheng mellom interaksjonsvariabler for hastighet og driftskostnader. Dette kan sees som et lite intuitivt resultat, men det er da viktig å bemerke at variablene vekt og hastighet er korrelert siden de begge interagerer med togkilometer: Det er med andre ord ikke den «rene» marginaleffekten av hhv. vekt og hastighet som parameterne viser. Vi har testet en rekke modellspesifikasjoner, og finner at negativ sammenhenger mellom interaksjonsvariabler for hastighet og driftskostnader er et robust resultat. En forklaring kan være at lettere tog (f.eks. persontog) operer med høy hastighet, samtidig som slitasjen de påfører er lavere enn tyngre tog.

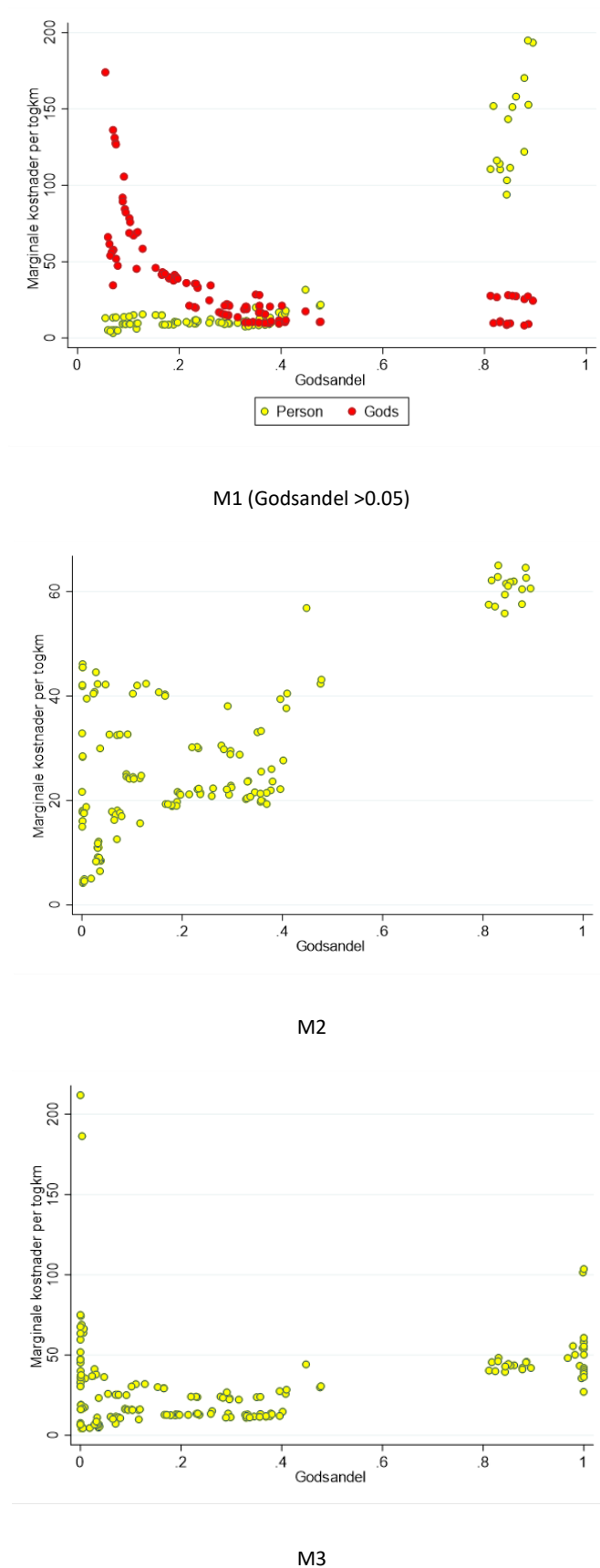
Vi har også gjort tester hvor vi har utelatt noen av interaksjonsvariablene i estimeringen. Dette endrer ikke fortegnet til hastighetsparameteren, men fører heller til større variasjon i predikerte marginal-kostnader. Vi ser derfor bort fra modeller hvor enkelte av interaksjonsvariablene er utelatt.

Tabell 6.7: Sammenliknende statistikk for estimerte marginale kostnader ved bruk av modellene M1-M3.

	N	Gj.snitt	St.avvik	Min	Maks
MK Person, M1	148	23.6	41.3	1.2	194.8
MK Gods, M1	148	804.6	2790.3	8.3	25064.5
MK, M2	148	27.9	15.7	4.2	65.0
MK, M3	205	28.7	25.2	4.2	211.9

Tabell 6.7 beskriver estimerte marginale slitasjekostnader for modellene M1-M3, hvor modell M1 skiller mellom tonnkilometer for person- og godstransport mens M2 og M3 benytter samlede togkilometer. Det fremgår av tabellen at modell M1 gir urealistiske maksimalverdier for slitasjekostnader for godstog, og at modell M2 gir langt mer konsentrerte estimater enn de to øvrige modellspesifikasjonene.

Figur 6.4 presenterer estimerte marginale slitasjekostnader per modell og etter godsandel. Resultatene til M1 presenteres kun for baner med godsandel >0.05 for å hindre visualisering av uteliggere (jf. tabell 6.7, hvor maksverdien til M1 er oppgitt å være 25 064 kr/km). Figurene viser at M1 portretterer marginale kostnader for godstog (persontog) som fallende i godsandel (personandel), mens M2 og M3 finner en positiv sammenheng mellom godsandel og marginale slitasjekostnader. Det sistnevnte er i tråd med hva vi forventer *a priori*. Samtidig viser figur 6.4 at modell M3 er mer sårbar for uteliggere enn modell M2, som viser en konsistent, økende konveks sammenheng mellom godsandel og marginale kostnader. Disse egenskapene gjør at vi anbefaler modell M2 til beregninger av marginale slitasjekostnader for daglig vedlikehold.



Figur 6.4: Estimerte marginale slitasjekostnader for modellene M1-M3, etter godsandel. For modell M1 vises kun resultater for enheter med godsandel > 0.05 for å hindre visualisering av uteliggere.

6.4.4 Sensitivitetsanalyse

Vi ønsker avslutningsvis å illustrere robustheten i resultatene til modell M2, ved å implementere ulike kontrollregresjoner:

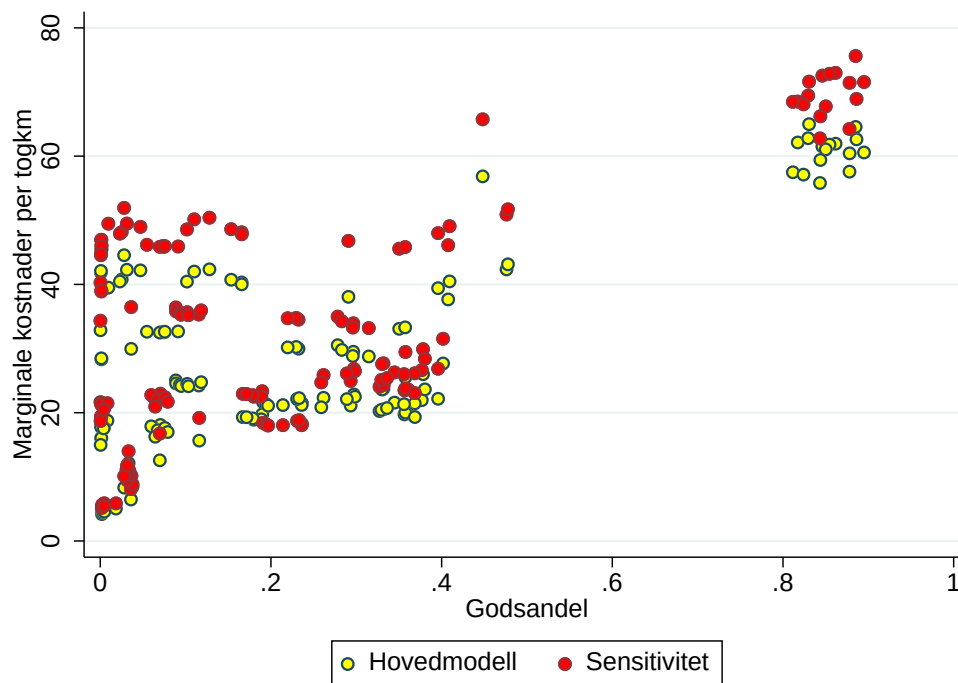
S1: Å estimere modellen med infrastrukturvariablene Antall sporveksler, Plattformlengde i meter, Tunneler i meter, Bruer i meter og Elektrifisert (dummyvariabel) som kontekstuelle variabler.

S2: Å estimere modellen uten Ofotbanen, som kan sees som en uteligger i det norske jernbanesystemet

S3: Å estimere modellen med faste effekter, for å kontrollere for banespesifikke forskjeller

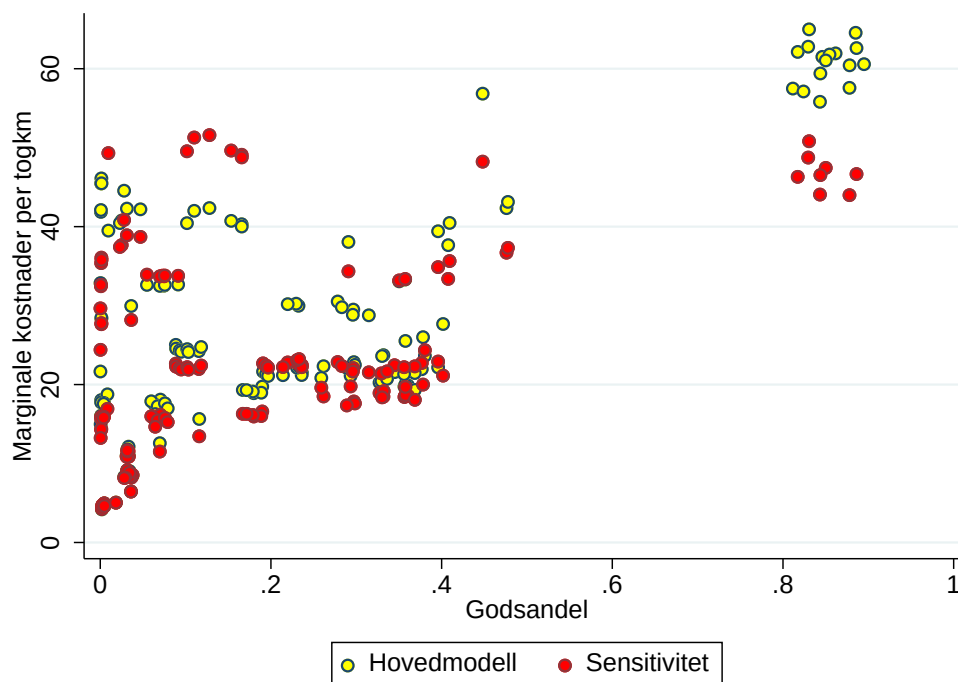
S4: Å kontrollere for geografiske forskjeller ved Ofotbanen og Osloområdet, sammenliknet med andre baner (som i Bane NOR (2023) sin referansem modell).

I beregningen av S1 finner vi at ingen av effektene av infrastrukturvariablene er statistisk signifikante på 5-prosentsnivået. Samtidig gir inkluderingen av infrastrukturattributtene en svak økning i marginale slitasjekostnader, noe som er illustrert av figur 6.5. Basert på denne oversikten, mener vi at alternativspesifikasjonen med infrastrukturvariabler ikke er å foretrekke foran modellspesifikasjon M2.



Figur 6.5: Sammenlikning av estimerte marginale slitasjekostnader ved bruk av modellene M2 og S1.

Figur 6.6 sammenlikner marginale slitasjekostnader fra M2 med S2, hvor den sistnevnte fjerner modell M2 på et datagrunnlag der Ofotbanen ikke inngår. Figuren viser at det er nær sammenheng mellom resultatene til de to beregningene, men at marginalkostnadsestimatene blir noe lavere når Ofotbanen fjernes fra datagrunnlaget. Gjennomsnittlig slitasjekostnad faller fra 28 kr/togkm til 24 kr/togkm mens maksimumsverdien faller fra 65 kr/togkm til 52 kr/togkm.

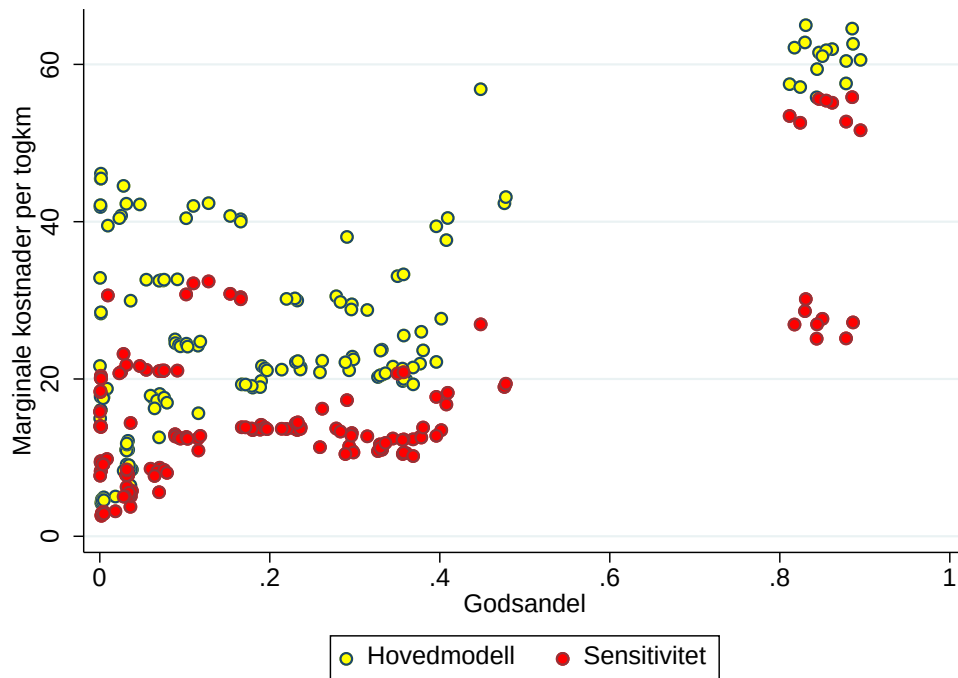


Figur 6.6: Sammenlikning av estimerte marginale slitasjekostnader ved bruk av modellene M2 og S2.

Videre ser vi på konsekvensene av å kontrollere for uobserverbar heterogenitet mellom jernbaner, ved å anvende en såkalt paneldatamodell med faste effekter. En ulempe med denne modellen er at den kun benytter variasjon innad i hver bane, og ser bort fra variasjon mellom baner. Dette er en ulempe siden vi forventer at det vil være større forskjeller i slitasjekostnader mellom baner sammenliknet med tilsvarende variasjon mellom år for den enkelt bane. Samtidig kan ikke effekten av variabler som er faste over tid (som antall kilometer med spor, som er benyttet i alle spesifikasjonene over) identifiseres ved bruk av modellen med faste effekter.

Bruk av faste effekter leder til både lav forklaringskraft og negative estimater av marginale slitasjekostnader. Vi anbefaler følgelig ikke bruk av modellen med faste effekter (S3).

Til slutt implementerer vi modell S4, hvor vi kontrollerer for interaksjonen mellom antall togkilometer og dummyvariabler for Ofotbanen og Osloområdet. Denne modellen leder til systematisk lavere estimater av marginale slitasjekostnader: Gjennomsnittlig slitasjekostnader er 16 kr/km mot 28 for M2 og maksimale slitasjekostnader er 55, mot 65 for modell M2.



Figur 6.7: Sammenlikning av estimerte marginale kostnader ved bruk av modellene M2 og S4.

Andre sensitivitetstester

I tillegg til robusthetssjekkene av modell M2 har vi også gjort en rekke alternative modellberegninger hvor vi bytter ut akselvekt med gjennomsnittsvekt og bruttotonn, både samlet og skilt på bruttotonn for gods- og persontog. I enkelte av beregningene finner vi at det er mulig å oppnå positive parameterestimater for hastighetsvariablene, men at disse resultatene ikke er robuste f.eks. ovenfor hvilke enheter vi kjører beregningene på. Vi har også forsøkt alternative beregninger hvor baner med svært høy og svære lav godsandel ikke inkluderes i datagrunnlaget, med tanke på at de kan ha en annerledes produksjonsteknologi enn baner som kombinerer gods- og persontransport. Alle disse alternativberegningene resulterer i «uteliggere» når det gjelder estimerte marginalkostnader, og vi konkluderer derfor med at modellen M2 har mer egnede egenskaper til beregning av marginale kostnader ved daglig drift og vedlikehold.

6.5 Anbefalinger

Vår gjennomgang viser overordnet at

- Bruk av translog-spesifikasjonen og tonnkilometer leder til negative kostnadselastisiteter
- Å skille mellom trafikkarbeid for gods- og persontransport skaper uteliggere i estimeringen av marginale slitastjekostnader
- Å kontrollere for sammenhengen mellom totalt trafikkarbeid og togenes akselvekt og hastighet gir robuste prediksjoner, og tillater samtidig differensiering mellom gods- og persontransport
- Attributter ved jernbanen – som antall brukere, tunneler og sporvekslere – har ikke en statistisk signifikant påvirkning på kostnadsnivået

Basert på disse funnene anbefaler vi modell M2 til beregningen av marginale slitastjekostnader. I kapitlet om sensitivitetsanalyse viser vi at kostnadsnivået til M2 kan påvirkes om vi tar hensyn til regionale forskjeller (eks. ved å ekskludere noen regioner i beregningen av kostnadsfunksjonen eller inkludere

regionsdummier). Samtidig er det viktig å bemerke at vi i denne studien ønsker et generelt eller gjennomsnittlig anslag på marginale slitasjekostnader.

Tabell 6.7 viser at et uvektet snitt av de predikerte marginale slitasjekostnadene med modell M2 lyder på 27,9 kroner/kilometer. Dersom vi legger andelen togkilometer til grunn for vektingen, blir gjennomsnittlig marginale slitasjekostnader pålydende 18,7 kroner/kilometer. Dette oppjusteres med kostnadsindeks for vedlikehold mellom 2021 og 2025, som gir en kostnad på 24,01 kr₂₀₂₅/togkilometer i 2025. Dette siste tallet anvendes i oppsummeringstabellene i kapittel 8.

Til beregninger i konkrete case anbefaler vi å plugge inn relevante parameterverdier i regresjonslikningen. For å predikere kostnader, benytter vi først formelen i likning 11.

$$\begin{aligned} \ln\widehat{Kostnad}_{it} &= 9.753 + 0.460\ln Togkm_{it} + 0.461\ln Sporkm_{it} \\ \ln\widehat{Kostnad}_{it} &= 9.753 + 0.460\ln Togkm_{it} + 0.461\ln Sporkm_{it} \\ &\quad + 0.035Aksellastperson_{it} \left(\frac{Togkm_{it}}{Togkmperson_{it}} \right) \\ &\quad + 0.024Aksellastgods_{it} \left(\frac{Togkm_{it}}{Togkmgods_{it}} \right) \\ &\quad - 0.006Hastighetperson_{it} \left(\frac{Togkm_{it}}{Togkmperson_{it}} \right) \\ &\quad - 0.009Hastighetgods_{it} \left(\frac{Togkm_{it}}{Togkmgods_{it}} \right) \end{aligned} \quad [11]$$

Deretter utledes marginale kostnader ved å putte inn de beregnede kostnadene inn i likning 12.

$$\begin{aligned} \widehat{MK}_{it} &= [\exp(\ln\widehat{Kostnad}_{it}) / Togkm_{it}] \times [0.461 \\ &\quad + \frac{0.035Aksellastperson_{it}}{Togkmperson_{it}} + \left(\frac{0.024Aksellastgods_{it}}{Togkmgods_{it}} \right) \\ &\quad - \frac{0.006Hastighetperson_{it}}{Togkmperson_{it}} - \frac{0.009Hastighetgods_{it}}{Togkmgods_{it}}] \end{aligned} \quad [12]$$

I datasettet har aksellast for persontog (godstog) et snitt på 13 (14), og varierer fra 9 (11) til 18 (17). Snitthastighet for persontog (godstog) er 88 (69) km/t, og varierer fra 0 (26) til 192 (80) km/t. Det er ingen sterk korrelasjon mellom aksellast og godsandel per bane, men snitthastigheten til persontog er negativt korrelert med godsandelen per bane (med en Pearson-korrelasjon på -0,4).

Oppdragsgiver har ønsket en modell hvor man kan differensiere mellom marginale slitasjekostnader knyttet til person- og godstransport. Vår gjennomgang viser at alternative modellspesifikasjoner som direkte skiller på person- og godstransport konsekvent leder til urealistiske marginalkostnadsestimater, spesielt når godsandelen er lav eller høy. Vi er dermed ikke i stand til å gi konkrete anbefalinger for separate beregninger av marginalkostnader for hhv. gods- og persontog.

Selv om vår foretrukne modellspesifikasjon kun gjør det mulig å presentere en identisk marginalkostnad for person- og godstog, fremgår det av likningene 11 og 12 at person- og godstogandelen samt hastighet og aksellast per togtype påvirker kostnadsestimatene. Ved å bruke likningene 11 og 12 kan man dermed belyse hvordan sammensetningen av person- og godstrafikken for en gitt bane påvirker marginale slitasjekostnader.

En svakhet ved den valgte modellen M2 er at den ikke er definert når gods- eller personandelen er 0. En mulig løsning er å gjøre separate analyse av slitasjekostnader for disse «hjørneløsningene». Samtidig utgjør de fåtallet av tilfeller i datasettet. Vi anbefaler derfor å tilnærme seg marginalkostnadene for hjørneløsninger ved å beregne marginalkostnader for tilfeller hvor person- eller godsandelene er tilnærmet lik 0.

6.5.1 Sammenlikning mellom slitasjekostnader for vei og jernbane

En sentral utfordring i dagens situasjon er at jernbane og vei bygger på grunnleggende ulike metodiske tradisjoner, både når det gjelder datagrunnlag og hvordan slitasje og marginalkostnader beregnes. Jernbaneslitasje er i større grad empirisk basert: man har relativt gode data for transportarbeid, togtyper og bruttotonn, og kostnader kan dermed knyttes direkte til faktisk trafikk. På veisiden er situasjonen motsatt. Her er slitasjekostnadene i hovedsak beregnet ut fra modeller, generaliserte verdier og nasjonale gjennomsnitt, med begrenset differensiering etter kjøretøy, aksellast og strekning.

Samtidig er kostnadskomponentene som inngår i de to metodene ikke sammenlignbare. Både på vei og jernbane behandles store deler av fornyelseskostnadene som faste. For vei inngår asfaltdekke som den sentrale variable kostnaden, mens øvrige vedlikeholds- og fornyelseselementer anses som mer faste - til tross for at strekninger med høy tungtrafikk i praksis utløser økt forsterknings- og fornyelsesbehov. For jernbane er bildet motsatt: en større del av både vedlikehold og reinvesteringer påvirkes av trafikk, men datakvaliteten og skillet mellom vedlikehold og fornyelse gjør det krevende å isolere den marginale komponenten presist. De to metodene treffer dermed hver sin side av problemet: veien undervurderer slitasje ved å avgrense kostnadsgrunnlaget, mens jernbanen risikerer å undervurdere vedlikehold ved å utelate fornyelseskomponenten.

I lys av dette er strengt harmoniserte metoder vanskelig å oppnå uten at man enten reduserer presisjonen på jernbanesiden eller tilfører veisiden et urealistisk detaljnivå. En meningsfull harmonisering bør derfor ikke sikte mot identiske metoder, men mot felles prinsipper, slitasjedrivere og datatyper. En naturlig harmonisering av infrastrukturkostnader for vei og jernbane vil være å tilstrebe etablering av et datagrunnlag som tillater vurderingen av marginale daglige infrastrukturkostnader ved veitransport gjennom bruk av statistiske metoder i kommende oppdateringer av kunnskapsgrunnlaget for skadekostnader for veitransport.

Appendiks

Vi starter med å gjenskape estimater og marginalkostnader basert på to tidligere utredninger av marginalkostnader.

Den første er basert på **Johansson og Nilsson (2004)** som beregner vedlikeholdskostnader for jernbane i Sverige og Finland.

Basert på Johansson og Nilsson (2004) estimerer følgende modell:²⁷

$$\begin{aligned} \ln Kost_{it} = & \alpha + \alpha_t + \beta_1 IkkeEl_{it} + \beta_2 \ln KmStrek_{it} + \beta_3 \ln BruttoTonnkm_{it} + \\ & \beta_4 \ln KmStrek_{it}^2 + \beta_5 \ln BruttoTonnkm_{it}^2 + \beta_6 \ln KmStrekBruttoTonnkm_{it} + \\ & \beta_7 AntallSporveksler_{it} + \beta_8 AntallSporveksler_{it}^2 + \beta_9 Hastighet_{it} + \beta_{10} Hastighet_{it}^2 + \varepsilon_{it} \end{aligned}$$

Tabell A1: Estimeringen av modellen til Johansson og Nilsson på norske data.

	Norge (2018-2024) (1)	Sverige (1994-1996) (2)	Finland (1994-1996) (3)
ikke_el/sekundær	-0.099 (-0.723)	0.005 (0.048)	-0.318*** (-4.936)
lnKmstrekning	3.878*** (8.094)	2.023*** (5.589)	1.504*** (3.462)
lnBruttotonnkm	-1.262*** (-2.937)	1.037*** (5.692)	0.167 (1.501)
lnKmstrekning ²	0.413*** (5.738)	0.023 (0.786)	-0.104*** (2.766)
lnBruttotonnkm ²	0.144*** (5.253)	-0.017*** (-2.995)	-0.006 (-1.519)
lnBruttotonnkmKmstrekning	-0.271*** (-7.334)	-0.096*** (-5.665)	0.001 (0.071)
Antall sporveksler	0.005*** (3.419)	0.010*** (3.462)	0.010*** (4.460)
Antallsporveksler ²	-0.000*** (-3.663)	-0.005 (-1.169)	-0.003*** (-2.264)
Vektet hastighet	0.003 (0.471)	-0.269*** (-3.022)	0.013*** (3.298)
Vektethastighet ²	-0.000 (-1.036)	-0.033*** (-3.773)	-0.013*** (-3.287)
Konstant	16.482*** (4.560)	-6.828*** (-4.210)	8.780*** (6.645)
R ²	0.910	0.736	0.827
N	205	520	298
Marginalkostnad ²⁸ (per bruttotonnkm) (2021NOK)	-0.01086	0.00158	0.00297

Note: Alle regresjoner inkluderer årsfaste effekter.

²⁷ Likningen korresponderer til likning (5) i Johansson og Nilsson (2004) estimert med finske data, og resultatene tilsvarer resultatene i første kolonne i tabell 5. Modell 4B i tabell 3 er samme modell for svenske data. En forskjell i data er at Johansson og Nilsson benytter gjennomsnittlig hastighet for alle tog, mens vi benytter vektet hastighet basert på antall og hastighet på hhv. gods- og persontog.

²⁸ I Rødseth et al. (2019) fant man en marginalkostnad på drift og vedlikehold tilsvarende 0.02 i 2019 NOK, basert på justerte elastisiteter fra VTIs studier.

Vi finner at den bruk av bruttotonnkilometer som trafikkvariabel samt den fleksible translog-spesifikasjonen leder til negative kostnadselastisiteter og dermed marginalkostnader. Dette er ikke i tråd med økonomisk teori, og vi forkaster derfor denne modellspesifikasjonen.

En reestimering av modellen ved bruk av togkilometer og med et skille mellom gods- og persontog viser at den fleksible spesifikasjonen leder til negative marginalkostnader. Dette er vist av tabell A2.

Tabell A2: Reestimering av modellen til Johansson og Nilsson (2004) basert på togkilometer og med skille mellom gods- og persontogkilometer.

	(1)
ikke_el	-0.475*** (0.163)
lnKgstrekning	2.141*** (0.334)
lnTogkgods	0.354*** (0.121)
lnTogkmperson	-0.060 (0.168)
lnKgstrekning2	0.762*** (0.165)
lnTogkgods2	0.024 (0.015)
lnTogkmperson2	0.067*** (0.013)
lnTogkgodsKgstrekning	-0.218*** (0.028)
lnTogkmpersonKgstrekning	-0.196*** (0.047)
lnTogkgodsTogkmperson	0.032** (0.015)
Antall sporveksler	0.005*** (0.002)
Antallsporveksler2	-0.000*** (0.000)
Vektet hastighet	-0.132*** (0.026)
Vektet hastighet2	0.001*** (0.000)
Constant	13.998*** (1.096)
r ² _a	0.910
N	156.000
Årsfaste effekter	Ja
MC – gods	-29.23
MC – person	-14.76

Ved å bruke togkilometer finner vi i snitt positive marginalkostnadsestimater, som vist av tabell A3. Samtidig viser tabellen at bruk av translog-spesifikasjonen gir et overraskende stort skille mellom marginalkostnadene til gods- og persontog, hvor marginalkostnadene til et persontog i snitt fremstår som langt mer betydelig enn til et godstog. Modellspesifikasjonene viser også at marginalkostnadsestimatene er betydelig påvirket av inkluderingen av kontekstuelle faktorer, til tross for at effekten til disse faktorene i liten grad beregnes til å være statistisk signifikant.

Tabell A3: Egne spesifikasjoner basert på translog-formen.

	(1)	(2)	(3)	(4)
InTogkmgods	0.106 (0.153)	-0.012 (0.136)	-0.120 (0.111)	
InTogkmperson	-0.472* (0.257)	-0.612*** (0.168)	-0.704*** (0.125)	-0.589*** (0.089)
InKmstrekning	1.500*** (0.456)	1.435*** (0.294)	1.486*** (0.179)	1.399*** (0.155)
InTogkmgods2	0.018 (0.018)	0.028* (0.015)	0.029** (0.013)	0.026* (0.013)
InTogkmperson2	0.065*** (0.018)	0.059*** (0.014)	0.056*** (0.008)	0.054*** (0.007)
InKmstrekning2	0.591** (0.254)	0.173 (0.138)		
InKmstrekningTogkmgods	-0.175*** (0.040)	-0.122*** (0.026)	-0.093*** (0.016)	-0.086*** (0.014)
InKmstrekningTogkmperson	-0.120* (0.071)	-0.032 (0.031)		
InTogkmgodsTogkmperson	0.041** (0.019)	0.027* (0.015)	0.026** (0.012)	0.017** (0.008)
Vektet aksellast	-0.752 (0.893)	0.146*** (0.027)	0.150*** (0.026)	0.137*** (0.024)
Vektet hastighet	-0.048 (0.046)	-0.010** (0.004)	-0.007** (0.003)	-0.009*** (0.003)
Tunneler, i meter	-0.000* (0.000)	0.000 (0.000)		
Bruer, i meter	-0.000 (0.000)	-0.000 (0.000)	-0.000 (0.000)	
Antall sporveksler	0.003 (0.002)	0.001 (0.001)		
Vektetaksellast2	0.031 (0.030)			
Vektethastighet2	0.000 (0.000)			
Tunnelerimeter2	0.000 (0.000)			
Bruerimeter2	0.000 (0.000)			
Antallsporveksler2	-0.000** (0.000)			
Elektrifisert	0.429* (0.251)	0.060 (0.157)		
Constant	19.640*** (6.505)	13.512*** (1.129)	14.319*** (0.949)	13.504*** (0.630)
r2_a	0.904	0.901	0.902	0.902
N	156.000	156.000	156.000	156.000
MC – gods	0.328	5.388	6.231	7.853
MC – person	12.175	14.162	12.983	13.65

Vi konkluderer med at bruken av bruttotonnkilometer som trafikkvariabel gjør modellen sårbar for negative kostnadselastisiteter og dermed marginalkostnadsestimater. Vi foretrekker derfor togkilometer som trafikk mål.

Vi har også vist at bruk av translog-spesifikasjonen leder til resultater som ikke er intuitivt riktig (for eksempel mtp. skillet mellom gods- og persontog), og at resultatene er sårbare for inkludering av kontekstuelle variabler. Basert på dette forstudiet, foretrekker vi Cobb-Douglas til våre hovedanalyser.

7 Infrastrukturslitasje fra togtransport – fornyingskostnader

7.1 Marginal fornyingskostnad

For infrastruktur er det også en viss sammenheng mellom kostnader knyttet til drift og vedlikehold og kostnader knyttet til reinvestering. Satt på spissen så vil en reduksjon i vedlikeholdsnivået antageligvis fremskynde eventuell reinvestering (ved at man bruker opp infrastrukturen raskere enn estimert levetid for et gitt vedlikeholdsnivå). Motsatt kan man øke intensiteten av vedlikehold og forlenge levetiden (og dermed utsette en reinvestering). I dette kapitlet vil vi se nærmere på marginal fornyingskostnad.

Fornyng dekker her tiltak der eksisterende anlegg eller komponenter erstattes med nye for å opprettholde eller forbedre funksjonalitet og sikkerhet. Dette er et tiltak som treffes når det ikke lengre er lønnsomt å kontrollere og utbedre anleggsdeler eller skifte ut komponenter. Dette kan være større systematiske tiltak for å ivare ta den langsiktige standard, eller mindre tiltak for å ivareta sikkerhet inntil mer omfattende tiltak kan gjennomføres

Teorien om marginale infrastrukturkostnader tar utgangspunkt i at fornyingssyklusen til en infrastrukturkomponent i jernbanenettet er planlagt i forhold til en normert årsdøgnsrafikk. Dersom den reelle trafikken øker (marginalt) i forhold til det normerte nivået, innebærer det at tiden mellom hver fornying av komponenten reduseres. Det er nåverdien av kostnadene ved et fremskyndet fornyingsintervall som følge av en trafikkøkning (ut over normert årsdøgnsrafikk) vi omtaler som marginal fornyingskostnad.

7.2 Metodevalg

Tilsvarende som for daglig drift, så har ligger VTIs metode for Sverige langt fremme. Her beregnes marginale fornyingskostnader basert på et stort paneldatasett for banekomponenter i Sverige (med spesifisering av år for og kostnader ved fornying per komponent). De anvender to metodiske tilnærminger:

- **Levetidsanalyse:** Weibull-regresjon
- **Heckmann 2-steg:** Predikerer sannsynlighet for fornying i steg 1, og estimerer fornyingskostnader i steg 2 – betinget på steg 1.

I Norge har vi ikke etablert et tilsvarende paneldatasett for komponenter med kostnad og levetid. Det nærmeste man har er metodikken som Bane NOR benytter til å vurdere tilstanden til infrastrukturens tilstand, identifisere fremtidige fornyelsesbehov og være et systematisk underlag for langsiktige planlegging av investeringsbehov. Her utledes tilstand i en numerisk karakterskala hvor de laveste poengscorene indikerer et umiddelbart reinvesteringsbehov.

Dette er data som innhentes og aktivt forvaltes – og det ville være en fordel å gjenbruke data som gjennomgår kvalitetssikring gitt utfordringene man har hatt med å fremskaffe gode tidsserier. Vi undersøkte derfor i samarbeid med Bane NOR om det lot seg utlede en elastisitet mellom levetid og trafikkmengde basert på deres verktøy *InfraStatus*.

Kort sammenfattet så inndeles trafikkbelastning i *InfraStatus* sitt modellverk i kilotonn per dag (kt/d), fordelt på fire klasser (<2, 2-15, 15-30, >30 kt/d). Dette gir dessverre ingen kontinuerlig sammenheng mellom belastning og levetid, og enkle utprøvinger med å justere dagens trafikkmengde med f.eks. ±10% gir ingen effekt på levetid. Vi falt derfor tilbake til en tilsvarende tilnærming som i Rødseth mfl. (2019), altså at man benytter kostnadselastisiteter fra svenske data, rekalkulert for Norge ved å benytte en korreksjonsfaktor mellom svenske og norske forhold, tilsvarende som i 2019.

Vi har mottatt data fra BaneNOR på fornyingskostnader *per bane* i perioden 2020-2024, samt trafikk tall for tilsvarende baner. Vi har gruppert de ulike banene inn i jernbaneregioner etter anbefalinger fra BaneNOR.

Tabell 7.1: Togkilometer per jernbaneregion i årene 2020 til 2024.

Region/År	2020	2021	2022	2023	2024
Midt	6 700 232	7 042 467	7 532 370	6 671 600	6 750 535
Nord	4 554 581	4 850 948	5 108 958	5 072 176	4 711 347
Oslo	11 657 864	11 660 532	12 256 129	12 145 942	12 196 453
Sør	8 461 731	8 161 683	8 891 857	8 739 674	9 006 892
Vest	3 153 628	3 579 869	4 087 717	3 827 063	4 020 562
Øst	9 360 870	9 861 669	9 728 749	11 740 441	12 064 251

Sammenstillingen av data er utarbeidet av Bane NOR, og de oppgir selv at i rådata fra regnskap er en del kostnader mulig å knytte direkte til baner, mens andre kostnader ligger på banesjef-/strekningssjefnivå, og atter andre på regioner over dette igjen. For kostnader som ikke er registrert på banenivå har er de fordelt proporsjonalt med sporkilometer.

Det var to omorganiseringer i Bane NOR som ga endret struktur i regnskapsdata i løpet av tidsserien, og som dermed skaper utfordring med konsistens over dataserien.

7.3 Resultater

Tabell 7.2 viser totale fornyingskostnader (2024 mNOK) per region som benyttes våre nye beregninger:

Tabell 7.2: Årlige fornyingskostnader i jernbanesektoren, etter jernbaneregion og år. Kilde: Egen aggregering av data fra BaneNOR.

Fornyingskostnader (2024 NOK)					
År	2020	2021	2022	2023	2024
Region					
Midt	655	1136	814	819	816
Nord	483	479	490	485	747
Oslo	372	433	591	677	1046
Sør	632	595	756	920	1052
Vest	392	384	527	547	971
Øst	496	433	514	560	707

Som synlig i tabellen over, er fornyingskostnaden voksende på tvers av alle regioner i perioden 2020-2024. Det er heller ikke noen tilsynelatende tett sammenheng mellom mengde infrastruktur og fornyingskostnad per år. Vi har derfor utledet to alternative modeller hvor vi i spesifikasjon 1 (MK1) benytter gjennomsnittlig fornyingskostnad over alle baner og år, mens i spesifikasjon 2 (MK2) vekter etter togkilometer per bane og år. Den sistnevnte modellen gir et riktigere bilde på hva fornying koster per trafikk enhet i jernbanesystemet, med den ulempen at eventuelle forskjeller mellom mindre trafikkerte baner og høyt-trafikkerte baner undertrykkes noe.

Tabell 7.3 presenterer kostnadselastisiteter per jernbaneregion, som fremstilt av Rødseth mfl. (2019), i tillegg til beregnede marginale kostnader i 2024-NOK per togkilometer for hver av vektingene M1 og M2. Tabellen viser at en vekting med togkilometer (M2) systematisk leder til en lavere predikert marginal fornyingskostnad per område.

Tabell 7.3: Kostnadselastisiteter og beregnede marginalkostnader (MK) per jernbaneregion. Kilde: Rødseth mfl. (2019) og egen aggregering av data fra BaneNOR.

	Kostnadselastisitet	MK1	MK2
Region			
Midt	0,5162	608,4	38,9
Nord	0,4725	76,9	33,4
Oslo	0,4659	35,1	14,3
Sør	0,5579	93,1	32,2
Vest	0,567	154,0	53,7
Øst	0,5311	42,7	17,1
Total	0,5222885	178,6	30,1

Til samletabellene i kapittel 9 baserer vi oss på landsgjennomsnittet for marginale slitasjekostnader basert på MK2. Beløpet på 30,10 NOK₂₀₂₄ justeres med konsumprisindeksen opp til 30,95 NOK₂₀₂₅.

7.3.1 Sammenligning 2019

Våre nye beregninger bygger på Rødseth mfl. (2019). Det er derfor hensiktsmessig å gjøre en sammenlikning med denne studien. Vi starter med å presentere samlede fornyingskostnader fra den tidligere studien i tabell 7.4.

Tabell 7.4: Totale fornyingskostnader per jernbaneregion i perioden 2014-2018. Kilde: Rødseth mfl., 2019.

Region	Fornyingskostnader fra 2019 (omregnet til 2024 mNOK)			
	2014	2015	2016	2018
Midt	609	736	872	576
Nord	378	504	637	519
Oslokorridoren	637	861	1359	923
Sør	333	440	705	419
Vest	389	602	883	526
Øst	423	627	772	758

Vi har valgt å ikke slå sammen datasettene som en samlet tidslinje, delvis fordi vi er usikre på om regioninndelingen og/eller kostnadskomponentene er konsistent definert over hele tidsperioden. Det siste skyldes at TØI selv aggregerte kostnadstall fra Agresso i 2019, mens det er BaneNOR som har sammenstilt de nye kostnadstallene.

Begge beregningene bygger på tidsserier med relativt kort varighet. Sammenligner man disse, ser man også at nivåene på fornying varierer betydelig mellom regionene og over år. Også i 2019-rapporten, ble marginalkostnadene vektet med togkilometer, slik som for MK2. Vi har derfor beholdt denne metoden også i denne sammenlikningen – slik at tallene for øvrig er utledet på samme måte. Resultatene er presentert av tabell 7.5. Merk at de nye tallene er lavere enn de tilsvarende tallene fra 2019 (som er i 2024 kr):

Tabell 7.5: Sammenlikning av marginale kostnader mellom de nye beregningene og beregningene til Rødseth mfl. (2019).

Fornyingskostnader (alle tall i 2024 NOK)		
	2019	2024
	M.kost	M.kost
Region		
Midt	65.0	40.6
Nord	101.7	34.8
Oslokorridoren	21.7	14.9
Sør	53.2	33.6
Vest	81.6	56.0
Øst	47.4	17.8

7.4 Feilkilder/forbehold og anbefalinger

Våre nye resultater tyder på at marginale fornyingskostnader er lavere i inneværende periode, sammenliknet med studien fra 2019. Selv om det kan ha skjedd en reell reduksjon i slitasjekostnadene, er det også en rekke andre faktorer som kan forklare nedgangen.

En hovedutfordring med denne tilnærmingen, som beskrevet i jernbanevurderingen i Bertelsen et al. (2021) er kombinasjonen av den korte tidsserien og den store variasjonen i reinvesteringsnivåene over år. Hvis vedlikeholdet hadde tilsvart slitasjen (altså intet «vedlikeholdsetterslep») så ville det vært fornuftig å anta at reinvesteringsnivået ville følge de komponentene som til enhver tid løp ut på dato. Det at vi finner lavere marginalkostnader i denne studien, sammenliknet med den tidligere studien, kan med andre ord skyldes tilfeldigheter knyttet til analyseperioden. Det kan også være forskjeller i måten fornyingskostnadene er aggregert på, og hvordan de er fordelt mellom jernbaneregioner mellom de to studiene.

InfraStatus 2024 (Bane NOR, 2024) og tidligere *InfraStatus*-rapporter viser at vedlikeholdsetterslepet varierer over år (og stort sett akkumuleres) noe som også betyr at bekymringen innledningsvis om at det er en fleksibilitet mellom drift og reinvestering antageligvis er legitim.

I en svensk studie av dynamikken mellom vedlikehold og fornyelse (Odolinski & Wheat, 2018) viser de at vedlikehold og fornyelse utgjør en slags felles slitasjefunksjon, gjennom nettopp at høye vedlikeholdskostnader i et år er en sterk prediktor for fornyelse (men *ingen motsatt effekt*). Det vil altså si at antagelsen om at fornyelse skal redusere vedlikeholdskostnadene i påfølgende år ikke ser ut til å holde. Denne sammenhengen og «dynamikken» mellom de to typene utbedringer, tilsier at dette ikke er uavhengige kostnadsblokker, men potensielt deler en underliggende slitasjefunksjon.

Satt på spissen så kan man jo tolke dette slik at en eventuelt systematisk underestimering av marginalkostnaden for vedlikehold forsterkes ytterligere hvis det medfører riktighet at den også trekker fornyelsesintervallene nærmere i tid.

Datagrunnlaget i *InfraStatus* inneholder mye av den informasjonen som ligger til grunn for en bedre vurdering av reinvestering hvor man kan benytte *InfraStatus'* øvrige data til å forsøke å kontrollere for det estimerte vedlikeholdsetterslepet slik at man i større grad reduserer «spillover»-effekten mellom «utsatt vedlikehold» og fornying. Dette krever en del arbeid med grunnlagsdata og metodeutvikling av en «helnorsk» tilnærming, altså hvor man på sikt erstatter de svenske elastisitetene med tilsvarende norsk data.

Våre beregninger tyder på at fornyingskostnadene er blant skadekostnadene som er av størst økonomisk betydning. Det vil derfor være relevant å styrke metodikken til beregning av marginale fornyingskostnader på norske data, for å verifisere at de anslåtte marginalkostnadene ligger på et forventningsrett nivå gitt gjeldende praksis for fornying av norske jernbane. Dagens metodikk har betydelige svakheter ved at den bygger på økonomiske estimater fra Sverige, samt at tidsserien som er

tilgjengelig til beregning av gjennomsnittskostnader er kort. Ytterligere viser resultater fra Odolinski og Wheat (2018) at fornyelseskostnader ofte opptrer i perioder (og ikke rent engangs lump-sum fornyelser), og at dette krever en høyere presisjonsgrad i datagrunnlaget; slik at man kan skille mellom det som er kapasitetsøkende tiltak fra det som i en mer strikt forstand er fornyelse. Dette innebærer at vi vurderer de nye estimatene presentert i denne rapporten som svært usikre.

Ved å modellere hvordan vedlikehold utsettes og akkumuleres og eventuelt utløser fornyelser, kan man fange opp store fremtidige kostnader som dagens marginalkostnadsmetoder i noen grad overser. Dette kan gi betydelige utslag i samfunnsøkonomiske analyser, særlig på strekninger hvor fornyelseskostnadene er store. Dette vil på sikt styrke analysene slik at de bedre reflekterer den reelle belastningen trafikken påfører infrastrukturen.

8 Sammenstilling av marginale skadekostnader

I dette kapitlet gis en sammenfatning av de marginale skadekostnadene beregnet i de foregående kapitlene, hvor vi summerer opp skadekostnader per kjøretøykilometer for person- og godstransport med jernbane. For godstransport inkluderer vi også oppsummering per tonnkilometer. Alle kostnader er gitt for året 2025 og er målt i 2025-kr. Tabellene med underlag er også delt med Oppdragsgiver i Excel-format for å gjøre videre anvendelse enkelt.

Denne rapporten har inkludert skadekostnader knyttet til CO₂-utslipp, lokal luftforurensing, støy, ulykkesrisiko, slitasje knyttet til vedlikehold og slitasje knyttet til fornying, på lik linje med TØI-rapport 1704. For hver av disse typene skadekostnader har det vært oppdateringer av datagrunnlaget, og noe oppdatering av metodikk. I tillegg er det foretatt realprisjusteringer.

På grunn av at skadekostnadene knyttet til støy varierer mye utfra hvorvidt støyforurensingen finner sted på dagtid (kl. 0700-1900), kveldstid (kl. 1900-2300) eller nattestid (kl. 2300-0800), vurderer vi det som nyttig å lage separate tabeller som skiller mellom tid på døgnet. De ulike tabellene vil passe til ulike typer analyser. Vi legger imidlertid vekt på resultatene knyttet til dagtid (tabell 8.1), da dette både er det største tidsrommet og tidsrommet hvor mest transport finner sted. Tilsvarende tabeller for kveldstid og nattestid gis i henholdsvis tabell 8.2 og tabell 8.3.

I sammenligningstabellene tar vi utgangspunkt i et «gjennomsnittlig» persontog og et «gjennomsnittlig» godstog (kombitog)²⁹, og skiller mellom elektrisk og dieselbasert fremdrift. Det vil naturligvis være variasjoner innad i disse gruppene, som kan hensyntas dersom analytikeren har denne informasjonen tilgjengelig. For eksempel vil lettere og kortere tog generelt bidra til mindre slitasje enn lengre og tyngre tog, og dersom det er dieseldrevet vil det også ha lavere dieselforbruk og utslipp. For sistnevnte type skadekostnader er det mulig å bruke informasjonen i kapittel 2 til å foreta justeringer til de aktuelle analysene. Videre benytter vi oss av gjennomsnittsestimater for marginale skadekostnader fra slitasje knyttet til både vedlikeholdskostnader og fornyingskostnader. Som vist i kapittel 5 og 6 er det vesentlige variasjoner mellom ulike regioner og strekninger. Dersom aktuelt for analysen kan analytikeren benytte seg av regionsspesifikke estimater. Dette er også inkludert i Excel-arkene oversendt til Oppdragsgiver.

²⁹ Her forutsettes eksplisitt en bruttovekt på 1010 tonn og en lastvekt (utenom lastbærere) på 313 tonn.

Tabell 8.1: Marginale skadekostnader for togtransport (kr per kjøretøykilometer), dagtid (perioden 0700-1900 sett under ett).

Togtype	Drivstoff	Områdetype	CO ₂	Lokale utslipp	Støy	Ulykker	Slitasje (Vedlike-hold)	Slitasje (Fornyng)	SUM
Persontog	Elektrisk	Spredt bebyggelse	0,00	0,00	0,00	1,14	24,01	30,95	56,10
Persontog	Elektrisk	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	0,00	0,00	0,00	1,14	24,01	30,95	56,10
Persontog	Elektrisk	Tettsted (>100 000 innb.)	0,00	0,00	0,00	1,14	24,01	30,95	56,10
Gjennomsnittlig kombitog (gods)	Elektrisk	Spredt bebyggelse	0,00	0,00	0,50	0,62	24,01	30,95	56,08
Gjennomsnittlig kombitog (gods)	Elektrisk	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	0,00	0,00	1,30	0,62	24,01	30,95	56,88
Gjennomsnittlig kombitog (gods)	Elektrisk	Tettsted (>100 000 innb.)	0,00	0,00	1,80	0,62	24,01	30,95	57,38
Persontog	Diesel	Spredt bebyggelse	6,42	1,06	0,00	1,14	24,01	30,95	63,58
Persontog	Diesel	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	6,42	7,40	0,00	1,14	24,01	30,95	69,92
Persontog	Diesel	Tettsted (>100 000 innb.)	6,42	45,36	0,00	1,14	24,01	30,95	107,88
Gjennomsnittlig kombitog (gods)	Diesel	Spredt bebyggelse	19,15	3,17	0,50	0,62	24,01	30,95	78,40
Gjennomsnittlig kombitog (gods)	Diesel	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	19,15	22,08	1,30	0,62	24,01	30,95	98,11
Gjennomsnittlig kombitog (gods)	Diesel	Tettsted (>100 000 innb.)	19,15	135,38	1,80	0,62	24,01	30,95	211,91

Tabell 8.2: Marginale skadekostnader for togtransport (kr per kjøretøykilometer), kveld (perioden 1900-2300)

Togtype	Drivstoff	Områdetype	CO ₂	Lokale utslipp	Støy	Ulykker	Slitasje (Vedlike-hold)	Slitasje (Fornyng)	SUM
Persontog	Elektrisk	Spredt bebyggelse	0,00	0,00	0,00	1,14	24,01	30,95	56,10
Persontog	Elektrisk	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	0,00	0,00	0,10	1,14	24,01	30,95	56,20
Persontog	Elektrisk	Tettsted (>100 000 innb.)	0,00	0,00	0,10	1,14	24,01	30,95	56,20
Gjennomsnittlig kombitog (gods)	Elektrisk	Spredt bebyggelse	0,00	0,00	1,40	0,62	24,01	30,95	56,98
Gjennomsnittlig kombitog (gods)	Elektrisk	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	0,00	0,00	4,20	0,62	24,01	30,95	59,78
Gjennomsnittlig kombitog (gods)	Elektrisk	Tettsted (>100 000 innb.)	0,00	0,00	8,00	0,62	24,01	30,95	63,58
Persontog	Diesel	Spredt bebyggelse	6,42	1,06	0,00	1,14	24,01	30,95	63,58
Persontog	Diesel	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	6,42	7,40	0,10	1,14	24,01	30,95	70,01
Persontog	Diesel	Tettsted (>100 000 innb.)	6,42	45,36	0,10	1,14	24,01	30,95	107,98
Gjennomsnittlig kombitog (gods)	Diesel	Spredt bebyggelse	19,15	3,17	1,40	0,62	24,01	30,95	79,30
Gjennomsnittlig kombitog (gods)	Diesel	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	19,15	22,08	4,20	0,62	24,01	30,95	101,01
Gjennomsnittlig kombitog (gods)	Diesel	Tettsted (>100 000 innb.)	19,15	135,38	8,00	0,62	24,01	30,95	218,11

Tabell 8.3: Marginale skadekostnader for togtransport (kr per kjøretøykilometer), natt (perioden 2300-0700).

Togtype	Drivstoff	Områdetype	CO ₂	Lokale utslipp	Støy	Ulykker	Slitasje (Vedlikehold)	Slitasje (Fornyng)	SUM
Persontog	Elektrisk	Spredt bebyggelse	0,00	0,00	1,60	1,14	24,01	30,95	57,70
Persontog	Elektrisk	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	0,00	0,00	1,00	1,14	24,01	30,95	57,10
Persontog	Elektrisk	Tettsted (>100 000 innb.)	0,00	0,00	2,70	1,14	24,01	30,95	58,80
Gjennomsnittlig kombitog (goods)	Elektrisk	Spredt bebyggelse	0,00	0,00	21,20	0,62	24,01	30,95	76,78
Gjennomsnittlig kombitog (goods)	Elektrisk	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	0,00	0,00	68,80	0,62	24,01	30,95	124,38
Gjennomsnittlig kombitog (goods)	Elektrisk	Tettsted (>100 000 innb.)	0,00	0,00	119,80	0,62	24,01	30,95	175,38
Persontog	Diesel	Spredt bebyggelse	6,42	1,06	1,60	1,14	24,01	30,95	65,18
Persontog	Diesel	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	6,42	7,40	1,00	1,14	24,01	30,95	70,91
Persontog	Diesel	Tettsted (>100 000 innb.)	6,42	45,36	2,70	1,14	24,01	30,95	110,58
Gjennomsnittlig kombitog (goods)	Diesel	Spredt bebyggelse	19,15	3,17	21,20	0,62	24,01	30,95	99,10
Gjennomsnittlig kombitog (goods)	Diesel	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	19,15	22,08	68,80	0,62	24,01	30,95	165,61
Gjennomsnittlig kombitog (goods)	Diesel	Tettsted (>100 000 innb.)	19,15	135,38	119,80	0,62	24,01	30,95	329,91

For å summere opp kostnader per tonnkilometer for et gjennomsnittlig godstog samler vi sammen beregningene for dagtid, kveldstid og nattetid i tabell 8.4. Her forutsettes eksplisitt en bruttovekt på 1010 tonn og en lastvekt (utenom lastbærere) på 313 tonn.

Tabell 8.4: Marginale skadekostnader (kr per tonnkilometer) for gjennomsnittlig godstog (kombitog), for ulike områdetyper og tider på døgnet.

Drivstoff	Områdetype	Tid på døgnet	SUM per kjøretøykm	SUM per tonnkm
Elektrisk	Spredt bebyggelse	Dag	56,08	0,18
Elektrisk	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	Dag	56,88	0,18
Elektrisk	Tettsted (>100 000 innb.)	Dag	57,38	0,18
Diesel	Spredt bebyggelse	Dag	78,40	0,25
Diesel	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	Dag	98,11	0,31
Diesel	Tettsted (>100 000 innb.)	Dag	211,91	0,68
Elektrisk	Spredt bebyggelse	Kveld	56,98	0,18
Elektrisk	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	Kveld	59,78	0,19
Elektrisk	Tettsted (>100 000 innb.)	Kveld	63,58	0,20
Diesel	Spredt bebyggelse	Kveld	79,30	0,25
Diesel	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	Kveld	101,01	0,32
Diesel	Tettsted (>100 000 innb.)	Kveld	218,11	0,70
Elektrisk	Spredt bebyggelse	Natt	76,78	0,25
Elektrisk	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	Natt	124,38	0,40
Elektrisk	Tettsted (>100 000 innb.)	Natt	175,38	0,56
Diesel	Spredt bebyggelse	Natt	99,10	0,32
Diesel	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	Natt	165,61	0,53
Diesel	Tettsted (>100 000 innb.)	Natt	329,91	1,05

8.1 Sammenlikning med Rødseth mfl. (2020)

Vi ønsker avslutningsvis å presentere en sammenlikning mellom resultatsammenstillingen for skadekostnader ved jernbanetransport fra Rødseth mfl. (2020) og de nye beregningene. For å kunne sammenlikne tallene har vi henført resultatene fra Rødseth mfl. (2020) til felles prisår ved å skalere de med en faktor på 2,765 for CO₂ (nominell karbonpris), 1,397 for vedlikehold og fornying (indeks for drift- og vedlikehold) og 1,369 (nominell vekst i BNP per innbygger) for lokal luftforurensing, støy og ulykker.

Tabell 8.5: Sammenlikning av marginale skadekostnader for togtransport (kr per kjøretøykilometer) på dagtid (perioden 0700-1900 sett under ett) mellom Rødseth mfl. (2020) og denne studien.

Studie	Togtype	Drivstoff	Områdetype	CO ₂	Lokale utslipp	Støy	Ulykker	Drift og vedlikehold*	Re-investering*	SUM
TØI (2020)	Person	Elektrisk	Spredt bebyggelse	0,00	0,00	0,62	1,43	25,26	45,73	73,04
TØI (2020)	Person	Elektrisk	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	0,00	0,00	1,66	1,43	25,26	45,73	74,08
TØI (2020)	Person	Elektrisk	Tettsted (>100 000 innb.)	0,00	0,00	1,64	1,43	25,26	45,73	74,06
TØI (2020)	Gods	Elektrisk	Spredt bebyggelse	0,00	0,00	3,60	1,86	25,26	45,73	76,45
TØI (2020)	Gods	Elektrisk	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	0,00	0,00	12,06	1,86	25,26	45,73	84,91
TØI (2020)	Gods	Elektrisk	Tettsted (>100 000 innb.)	0,00	0,00	12,64	1,86	25,26	45,73	85,48
TØI (2020)	Person	Diesel	Spredt bebyggelse	5,39	1,88	0,62	1,43	25,26	45,73	80,30
TØI (2020)	Person	Diesel	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	5,39	9,07	1,66	1,43	25,26	45,73	88,53
TØI (2020)	Person	Diesel	Tettsted (>100 000 innb.)	5,39	50,87	1,64	1,43	25,26	45,73	130,31
TØI (2020)	Gods	Diesel	Spredt bebyggelse	28,96	10,08	3,60	1,86	25,26	45,73	115,50
TØI (2020)	Gods	Diesel	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	28,96	48,78	12,06	1,86	25,26	45,73	162,65
TØI (2020)	Gods	Diesel	Tettsted (>100 000 innb.)	28,96	273,54	12,64	1,86	25,26	45,73	387,99
Denne	Person	Elektrisk	Spredt bebyggelse	0,00	0,00	0,00	2,23	24,01	30,95	57,19
Denne	Person	Elektrisk	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	0,00	0,00	0,00	2,23	24,01	30,95	57,19
Denne	Person	Elektrisk	Tettsted (>100 000 innb.)	0,00	0,00	0,00	2,23	24,01	30,95	57,19
Denne	Gods	Elektrisk	Spredt bebyggelse	0,00	0,00	0,50	1,21	24,01	30,95	56,67
Denne	Gods	Elektrisk	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	0,00	0,00	1,30	1,21	24,01	30,95	57,47
Denne	Gods	Elektrisk	Tettsted (>100 000 innb.)	0,00	0,00	1,80	1,21	24,01	30,95	57,97
Denne	Person	Diesel	Spredt bebyggelse	6,42	1,06	0,00	2,23	24,01	30,95	64,67
Denne	Person	Diesel	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	6,42	7,40	0,00	2,23	24,01	30,95	71,00
Denne	Person	Diesel	Tettsted (>100 000 innb.)	6,42	45,36	0,00	2,23	24,01	30,95	108,97
Denne	Gods	Diesel	Spredt bebyggelse	19,15	3,17	0,50	1,21	24,01	30,95	78,99
Denne	Gods	Diesel	Tettsted (15 000 - 100 000 innb.)	19,15	22,08	1,30	1,21	24,01	30,95	98,70
Denne	Gods	Diesel	Tettsted (>100 000 innb.)	19,15	135,38	1,80	1,21	24,01	30,95	212,50

Tabell 8.5 sammenfatter resultattabellen fra Rødseth mfl. (2020) med de nye resultatene presentert i dette kapitlet. Vi begrenser sammenlikningen til dagtid, siden dette er tidsrommet hvor majoriteten av transportaktivitet normalt finner sted.

I gjennomsnitt er estimatene av totale skadekostnader per togkilometer 37.9 kroner lavere i den nye studien, sammenliknet med resultatene fra Rødseth mfl. (2020). Med unntaket av CO₂ og ulykker – hvor marginale kostnader knyttet til persontogtransport er marginalt høyere i de nye beregningene, sammenliknet med Rødseth mfl. (2020) – er det et negativt avvik for alle kostnadskomponenter. Det største avviket på hele 138 kroner per kilometer finner vi for lokal luftforurensing for godstog som operer med dieseldrift i store tettsted. Det er også et betydelig avvik mellom skadekostnader ved CO₂-utslipp fra godstog som opererer med dieseldrift i tettbygde strøk, samt for støykostnader. En viktig forskjell mellom de nye og gamle beregningene mtp. utslipp til luft er beregnet lavere drivstofforbruk samt en lavere NO_x intensitet. Dette skyldes i stor grad innfasing av nyere dieselmotorer, hvor bl.a. noen motortyper har hybridteknologi. For støy skyldes avvikene en rekke forhold, både når det gjelder metodikk og utvalgelse av case til analysene. Vi viser til de respektive kapitlene om de ulike skadekostnadene for detaljer om beregningene og årsakene til avvikene. Det er også et negativt avvik på ca. 15 kroner per kilometer for reinvesteringskostnader mellom de nye og gamle beregningene. Vi har tidligere pekt på at en plausibel årsak til dette er at de tilgjengelige datasettene som ligger til grunn for analysene har kort tidshorisont, og at ulikhetene mellom beregningene kan skyldes tilfeldigheter heller enn en reell nedgang i marginale fornyingskostnader.

9 Konklusjon og diskusjon

9.1 Konklusjon

Denne rapporten dokumenterer og presenterer oppdaterte estimater for marginale skadekostnader for jernbanetransport, knyttet til både person- og godstransport. Vi gjennomgår skadekostnader knyttet til CO₂-utslipp, lokal luftforurensing, støy, ulykkesrisiko, slitasje knyttet til vedlikehold og slitasje knyttet til fornying, på lik linje med TØI-rapport 1704. For hver av disse typene skadekostnader har det vært oppdateringer av datagrunnlaget, og noe oppdatering av metodikk. I tillegg er det foretatt realprisjusteringer.

For skadekostnader knyttet til utslipp til luft har vi fått oppdatert datagrunnlaget for drivstofforbruket per togkilometer for dieseldrevne persontog og dieseltog. Det har også vært oppdateringer i datagrunnlaget for NO_x-utslipp per liter diesel. Når det gjelder skadekostnader per utslippenhet er CO₂-kostnader oppdatert i henhold til Finansdepartementets veiledning, og kostnadene knyttet til PM₁₀ og NO_x er oppdatert med realprisjustering og befolkningsvekst i byområder (m.t.p. eksponering). I kapittel 2.3 har vi også inkludert to case-studier med ny data og metodikk fra Folkehelseinstituttets pågående Verdssettingsprosjekt på henholdsvis Trondheim og Bodø, to byer som har dieseltogstrekninger. Etter som case-beregningene er gjort for utslippene PM_{2,5} og NO₂, med færre verdsatte helse- og økonomiske utfall, og kun for to byer, anser vi dem ikke som direkte sammenlignbare med nåværende oppsett med skadekostnader for NO_x og PM₁₀ for tre generiske område kategorier. Det er imidlertid åpenbart at de nye estimatene innebærer marginale skadekostnader av en lavere størrelsesorden. Fram til Verdssettingsprosjektet til FHI er fullført, anbefaler vi å videreføre estimatene for marginale skadekostnader for PM₁₀ og NO_x. Dersom man i perioden før ferdigstilling av Verdssettingsprosjektet har en analyse hvor verdsettingen av lokale utslipp kan være utslagsgivende, anbefaler vi å gjennomføre en følsomhetsanalyse ved å teste ut implikasjonene av lavere verdsetting av PM₁₀ og NO_x.

For skadekostnader knyttet til ulykker har vi benyttet et bedre datagrunnlag for personskade i togulykker, sammenliknet med det vi hadde tilgang til i Rødseth et al. (2019, kap. 7). Utover det så har vi bygget videre på samme etablerte metodikk, som særlig er tuftet på Lindberg (2001; 2005). Våre hovedberegninger omfatter godstog og persontog, og også «annet tog» (tomkjøring, etc.), samt differensiering mht. togulykke typer (basert på en inndeling av personskadedata fra SJT). Dette sistnevnte tok vi med som erstatning for en opprinnelig forespørsel om differensiering mht. infrastrukturtype («ny» vs. «gammel»), nedprioritert. Vi fant klart høyest estimert ekstern marginal kostnad av personskade for «person-påkjørsel», og deretter «motpartulykke-vegkjøretøy» og «sammenstøt-diverse». Og så finner vi at persontog har litt høyere marginale eksterne kostnader for personskader i ulykker, per kjøretøykm, enn godstog, men at «annet tog» har de klart høyeste marginale eksterne kostnadene. Jernbanen (evt. sammen med skipsfart) har de laveste marginale eksterne kostnadene mht. transportarbeidet (kostnader per personkm og per tonnkm).

Når det gjelder materielle skader i ulykker, så har vi brukt samme metodiske ramme som for personskader, og vi har gjennomført en eksempelanalyse som gir noenlunde samme årlige totale kostnads-estimater som det vi kunne utlede fra datasett fra én av togoperatørene (Vy); men vi vil likevel vurdere estimatene for marginale eksterne kostnader av materielle skader i transportulykker som usikre. Vårt arbeid her utgjør ett bidrag som det gjerne kan bygges videre på.

For skadekostnader knyttet til støy har vi adressert flere svakheter ved metodikken brukt i Rødseth mfl. (2019). For det første har vi erstattet de stykkevis lineære enhetsprisene brukt til verdsetting med kontinuerlige funksjoner. For det andre har vi benyttet scenarioanalyse med støyberegningsverktøyet Nord96 til å beregne endringer i støy ved fasade når togtrafikken endres med ett ekstra tog, gods- eller persontog, på dag, kveld eller natt. Dette gjør oss i stand til å beregne endringer i støybelastning per husholdning mellom alternativ- og basisscenarioene, mens metoden til Rødseth (2019) kun benyttet

endring i utgangsstøy fra togene og tommelfingerregler til å anslå denne endringen. For det tredje, har denne studien gjort en grundig utvelgelse av case til analysen, og vi forventer derfor at beregningene vil være mer representative for den norske jernbanesektoren enn casene brukt i Rødseth mfl. (2019). Vi finner at de nye resultatene gir konsistent lavere marginale støykostnader enn beregningene til Rødseth mfl. (2019).

For skadekostnader knyttet til slitasjeeffekter på vedlikeholdskostnader brukte Rødseth mfl. (2019) en tilpassing av studier fra Sverige til å beregne marginale kostnader knyttet til daglig drift og vedlikehold. I den nye studien estimerer vi marginale slitasjekostnader gjennom å estimere en kostnadsfunksjon på et datasett om baner i Norge. Vi har testet ut en rekke modellspesifikasjoner, og finner at mange av funksjonsformene brukt i den internasjonale litteraturen (som Translog-formen) gir urimelige resultater. En grundig gjennomgang viser at en modellspesifikasjon med sporlengde og trafikk (målt i togkilometer) som kontrollerer for togenes attributter knyttet til akselvekt og hastighet gir troverdige og robuste estimater av marginale slitasjekostnader. Vi viser også at estimatene er økende i godsandel. Vår valgte modell gir til sammenlikning høyere estimater av marginale slitasjekostnader enn estimatene Bane NOR benytter til beregning av kjøreveisavgiften, mens vektet gjennomsnittlig marginalkostnad er sammenliknbar med beregningene til Rødseth mfl. (2019).

For fornyingskostnader gjør mangel på data og andre metoder det nødvendig å oppdatere beregningene til Rødseth mfl. (2019) med nye data for gjennomsnittlige fornyingskostnader per jernbaneregion. Vi finner at de oppdaterte beregningene av marginale fornyingskostnader ligger betydelig under de tilsvarende resultatene til Rødseth mfl. (2019). Vi understreker at dette ikke nødvendigvis innebærer at fornyingskostnadene reelt sett har falt, men at analyseperioden benyttet av de to studiene er kort på grunn av mangel på data. Vi anbefaler derfor å tolke og bruke tallene med varsomhet, og å søke å finne bedre metoder til beregning av marginale fornyingskostnader framover: Innenfor rammen av dette prosjektet har vi i samråd med Bane NOR utforsket å bruke deres verktøy InfraStatus til beregningene, men resultatene viste at dagens modelloppsett ikke er egnet til å beskrive sammenhengen mellom trafikkmengder og fornyingstakt. Derimot inneholder datagrunnlaget i InfraStatus mye av den informasjonen som ligger til grunn for en bedre vurdering av reinvestering. I en metodeutvikling kan man benytte InfraStatus' øvrige data til å forsøke å kontrollere for det estimerte vedlikeholdsetterslepet, slik at man i større grad reduserer «spillover»-effekten mellom «utsatt vedlikehold» og fornying. Dette vil kreve en del arbeid med grunnlagsdata og med metodeutvikling.

På samme måte som TØI-rapport 1704 er denne rapporten først og fremst en dokumentasjonsrapport og et oppslagsverk for en stor mengde skadekostnadsestimater som kan brukes i samfunnsøkonomiske analyser i Norge, men denne oppdateringen i 2025 har kun fokusert på jernbanetransport. Oppdrags-giver har også fått flere av tabellene i Excel-format for å kunne lett hente ut tallene til videre arbeid.

9.2 Diskusjon

Som påpekt gjennom hele rapporten er flere av estimatene for marginale skadekostnader beheftet med til dels stor usikkerhet. Det er usikkerhet i alle deler av beregningen, både knyttet til omfanget av de faktiske skadene, verdsettingen av disse. Skadekostnadsestimatene er dessuten tilpasset tre grove områdekategorier, noe som gjør det enklere å jobbe med, men samtidig reduserer presisjonen. Det anbefales derfor å gjennomføre følsomhetsanalyser med høyere så vel som lavere verdier for marginale skadekostnader i analyser hvor disse kan være utslagsgivende.

Det er også enkelte forhold som isolert sett indikerer at estimerte skadekostnader per km kan være undervurdert. Enkelte kategorier av skadekostnader er utelatt, og noen typer skadekostnader inkluderer ikke fulltelling av alle relevante skadetyper. Selv om det antas at disse utelatelsene kun ville gitt et mindre påslag på de sammenlagte skadekostnadsestimatene, representerer de likevel en kilde til skjevhet.

Det er for eksempel aspekter ved skadekostnadene knyttet til lokale utslipp til luft som ikke er inkludert i beregningene. Noen typer utslipp er ikke inkludert (f.eks. ozon O_3), og det er en del helseutfall som kan attribueres til luftforurensing som ikke er inkludert (f.eks. svekket kognitiv utvikling for barn), men vi har ikke funnet anvendelige parametere som kan implementeres i dagens oppsett. Et annet eksempel er knyttet til at skadekostnadene knyttet til støy ikke inneholder noe betalingsvillighet fra personer som ikke gjennomgår helseeffekter fra sterk støyplage, men som likevel har en betalingsvillighet for å redusere støynivåer fra togtransport.

Concept-rapport 66 (Halse et al., 2021) peker på behovet for å revurdere de anbefalte verdiene for karbonprisbaner (jf. kapittel 2.1.1) og verdien av statistisk liv (VSL). Eventuelle endringer bør fastsettes sentralt for å sikre konsistent bruk på tvers av sektorer (eller at sektorforskjeller er avklart eksplisitt). Det er derfor grunn til å gjennomgå disse verdiene ved neste større revisjon av retningslinjene for samfunnsøkonomiske analyser.

Endringer i VSL vil påvirke verdsettingen av marginale skadekostnader knyttet til ulykkesrisiko, støy og lokal luftforurensning, ettersom alle disse har helseeffekter. Halse et al. (2021) viser at det er faglige argumenter for å oppjustere VSL. Selv med utgangspunkt i foreliggende datagrunnlag, Verdsettingsstudien (Samstad et al., 2010) fremstår den nåværende kalkulasjonsverdien som lav, noe også internasjonale studier anvendt på norske forhold bekrefter.

Det kommer stadig ny forskning som er relevant for å oppdatere de marginale skadekostnadene fra transport, både på skadeomfanget og verdsettingen av den. Ved hver oppdatering av skadekostnads-estimatene til bruk i analyser i transportsektoren kommer det forbedringer metodikk og/eller datagrunnlag. Denne rapporten føyer seg inn i rekken, og representerer en forbedring i kunnskapsgrunnlaget sammenlignet med tidligere rapporter på temaet.

Skadekostnadene fra transport er betydelige, og det er ønskelig å finne en god balanse mellom disse og sektorens enorme nyttevirksomheter. Det er dermed ønskelig med stadig mer presisjon i estimeringen av marginale skadekostnader, og dermed behov for videre forskning på temaet framover.

9.3 Videre forskning

Det er potensiale for å forbedre kunnskapsgrunnlaget for samtlige typer skadekostnader i denne rapporten. Dersom man skulle prioritere utfra nåværende utslag på estimater av samlede skadekostnader per kjøretøykilometer, vil det være hensiktsmessig å prioritere videre forskning på hvor sterk **sammenhengen mellom slitasje fra togtrafikk og kostnader knyttet til vedlikehold og fornying** er. Disse kostnadene er de klart mest utslagsgivende på en kilometerbasis, for landet sett under ett (hvor mesteparten av trafikkarbeidet gjennomføres med elektriske tog og/eller utenfor tettbygde områder hvor få mennesker blir eksponert for støy eller luftforurensing). Dersom et bedre datagrunnlag ville avdekket at den «sanne» forventningsverdien for skadekostnader fra slitasje avviker f.eks. 20 % fra nåværende estimater, vil dette ha større utslag enn tilsvarende avvik for lokal luftforurensing. Vi ser dermed stort potensial i å analysere slike slitasje kostnader nærmere når det er bygd opp lengre tidsserier, og gjerne på et mer detaljer nivå.

Beslektet med dette temaet vil være utforskning av samfunnsøkonomisk **optimale vedlikeholdsregimer**. Hvis infrastruktureier skal maksimere samfunnets nytte av infrastrukturen over tid, så vil det innebære både styring av vedlikeholdsaktivitetene over tid, men også trafikkvolumet. Trafikkvolumet er jo selve kilden til nyttevirksomhetene, men det er også kilden til slitasje, og jo mer trafikk som pågår på infrastrukturen, jo vanskeligere er det å finne tidsrom å gjennomføre vedlikehold.

I det foregående kapitlet beskriver vi at en **videreutvikling av metodikk for marginale fornyingskostnader** basert på en videreutvikling av verktøyet InfraStatus vil være en fruktbar vei for å redusere usikkerheten knyttet til beregningene av marginale fornyingskostnader, som vi vurderer å være blant de mest usikre kostnadsberegningene. Dette vil være til stor nytte i forbindelse med beregningene av

skadekostnader ved transport på jernbanen, ettersom fornyingskostnadene utgjør en ikke-neglisjerbar andel av de samlede marginale kostnadene ved jernbanetransport.

I TØI-rapport 1953 ble det poengtert at det har vært behov for en oppdatering av datagrunnlag og metodikk på verdsetting av **lokal luftforurensing**. Dette pågår nå i forbindelse med FHI sitt Verdsettingsprosjekt. Når dette prosjektet er komplett vil det være behov for en prosess for å oppdatere skadekostnadsestimatene knyttet til lokal luftforurensing for alle transportformer, for å sikre konsistens.

Videre ser vi potensialet for å øke forståelsen for ulike drivere av de eksterne **ulykkeskostnadene**. Vi tenker særlig på å utforske hvor stort eventuelt utslag knyttet til alderen og vedlikeholdstilstanden til infrastrukturen har på ulykkesansynlighet og omfang (og dette var nevnt i forbindelse med prosjektableringen). Mer generelt kunne det være hensiktsmessig å undersøke nærmere geografisk differensiering for eksterne ulykkeskostnader, som befolkningstetthet og annet, i tillegg til infrastrukturtype/-kvalitet.

Avslutningsvis vil vi påpeke at det ikke bare er de eksterne kostnadene fra trafikkarbeidet som er interessant for samfunnsøkonomiske analyser i transportsektoren. Også analyser av infrastrukturen selv, f.eks. knyttet til hvordan **arealbeslaget og barrierene det legger i landskapet påvirker nivået og kvaliteten på økosystemtjenester** (f.eks. forsynende tjenester, regulerende og vedlikeholdstjenester, opplevelser). Dette er også beslektet med problematikken knyttet til hvordan arealbeslag fra infrastruktur passer inn i overholdelsen av internasjonale avtaler knyttet til opprettholdelse av naturareal. På samme måten som norske klimaforpliktelser medfører en skyggepris på utslipp som er førende for samfunnsøkonomiske analyser, kan naturforpliktelser medføre en skyggepris på areal. Dette er et svært viktig og interessant tema for videre forskning.

Referanser

Vi anerkjenner at noen av forfatterne har brukt Chat GPT 5 som sparringspartner, skrivehjelp og oversetter gjennom prosjektet.

- Bane NOR. (2023). *Direkte kostnader. Metodikk og beregninger av direktekostnader for prising av den minste pakken med tjenester*. Bane NOR SF.
- Bane NOR. (2024). *InfraStatus 2024*. Bane NOR SF.
<https://www.banenor.no/contentassets/4a5e76e87edc4f1ea0514b6e274bc9c1/infrastatus-2024.pdf>
- Basner, M. & McGuire, S. (2018). WHO environmental noise guidelines for the European region: a systematic review on environmental noise and effects on sleep. *International journal of environmental research and public health*, 15(3), 519.
- Bertelsen, D., Landmark, A. D., Kroksæter, A. & Johansen, J. M. (2021). Gjennomgang av slitasjekostnader for godstransport på veg og jernbane. *SINTEF-rapport, 2021*, 00476.
- Buø, T., Asphjell, T. & Bjørhei, M. (2025). *Reduserte utslipp av PM_{2,5}: Tiltak og virkemidler - vedfyring som kilde*. Miljødirektoratet. <https://kudos.dfo.no/documents/370368/files/47262.pdf>
- Chen, A., Jacobsen, K. H., Deshmukh, A. A. & Cantor, S. B. (2015). The evolution of the disability-adjusted life year (DALY). *Socio-economic planning sciences*, 49, 10-15.
- Cowi. (2004). *Total external costs of road and rail transport in Denmark. External costs of transport, 3rd Report*.
- Direktoratet for Økonomistyring. (2023). *Veileder i samfunnsøkonomiske analyser*. D. f. Økonomistyring.
<https://dfo.no/fagomrader/utredning-og-analyse-av-statlige-tiltak/samfunnsokonomiske-analyser/veileder-i-samfunnsokonomiske-analyser>
- EcoTransIT World Initiative. (2019). *Ecological Transport Information Tool for Worldwide Transports: Methodology and Data - Update 2019*.
https://download.ecotransit.world/EcoTransIT_World_Methodology_Data_Update_2019.pdf
- EEA. (2025). *Environmental noise in Europe [EEA Report 05/2025]*.
<https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/environmental-noise-in-europe-2025>
- Elvik, R. (1994). The external costs of traffic injury: definition, estimation, and possibilities for internalization. *Accident Analysis & Prevention*, 26(6), 719-732.
- Elvik, R. (2019). Framskrivning av antall skadde personer i ulykker der tunge kjøretøy er innblandet og av antall jernbaneulykker og drepte i jernbaneulykker. *TØI arbeidsdokument 51416/2019, Transportøkonomisk institutt (TØI), Oslo*.
- Engelmann, N., Blanes Guàrdia, N., Fons Esteve, J., Vienneau, D. & Rösli, M. (2024). Environmental noise health risk assessment: methodology for assessing health risks using data reported under the Environmental Noise Directive (Eionet Report–ETC HE 2023/11). *European Topic Centre on Human Health and the Environment*.
- Eriksen, K. S., Markussen, T. E. & Pütz, K. (1999). *Marginale kostnader ved transportvirksomhet* (Bd. 464). Transportøkonomisk institutt Oslo.
- Finansdepartementet. (2021a). *Hvordan ta hensyn til klimagassutslipp i samfunnsøkonomiske analyser*. Ministry of Finance. <https://www.regjeringen.no/no/tema/okonomi-og-budsjett/statlig-okonomistyring/hvordan-ta-hensyn-til-klimagassutslipp-i-samfunnsokonomiske-analyser/id2863676/>
- Finansdepartementet. (2021b). *Rundskriv R-109/21: Prinsipper og krav ved utarbeidelse av samfunnsøkonomiske analyser*. M. o. Finance.
https://www.regjeringen.no/globalassets/upload/fin/vedlegg/okstyring/rundskriv/faste/r_109_2021.pdf
- Finansdepartementet (2024). *Perspektivmeldingen 2024. Meld. St. 31 (2023-2024)*, Finansdepartementet.

- Fridstrøm, L. (1999). *Econometric models of road use, accidents, and road investment decisions. Volume 2: an econometric model of car ownership, road use, accidents, and their severity (Essay 3)*. Norway. Transportøkonomisk institutt (Institute of Transport Economics).
- Fridstrøm, L. (2011). A framework for assessing the marginal external accident cost of road use and its implications for insurance ratemaking.
- Färe, R. & Sung, K. J. (1986). On second-order Taylor's-series approximation and linear homogeneity. *Aequationes mathematicae*, 30(1), 180-186.
- GBD. (2021). *Global Burden of Disease Study 2021 (GBD 2021) Data Resources*.
- Ghosh, R., Causey, K., Burkart, K., Wozniak, S., Cohen, A. & Brauer, M. (2021). Ambient and household PM_{2.5} pollution and adverse perinatal outcomes: a meta-regression and analysis of attributable global burden for 204 countries and territories. *PLoS medicine*, 18(9), e1003718.
- Grønland, S. E. (2018). Kostnadsmodeller for transport og logistikk – basisår 2016. *TØI-rapport*, 1638/2018.
- Grønland, S. E. & Pinchasik, D. R. (2025). *Kostnadsmodeller for transport og logistikk - basisår 2023 [TØI-rapport 2093/2025]*. Institute of Transport Economics.
- Guski, R., Schreckenber, D. & Schuemer, R. (2017). WHO environmental noise guidelines for the European region: a systematic review on environmental noise and annoyance. *International journal of environmental research and public health*, 14(12), 1539.
- Halse, A. H., Wangsness, P. B. & Minken, H. (2021). *Endringer i beregningsforutsetninger og betydning for samfunnsøkonomisk lønnsomhet i samferdselsprosjekter [Concept-rapport nr. 66]* (Concept-rapport, Issue. Forskningsprogrammet Concept. <https://www.ntnu.no/documents/1261860271/1262010703/Concept-rapport+nr.+66.pdf/ae4c94be-a5de-f60e-7024-5be0d7b7b126?t=1639661795286>
- Helsedirektoratet. (2024). *Nasjonal veileder om virkninger på helse og livskvalitet i utredninger og samfunnsøkonomiske analyser – temaveileder til utredningsinstruksen [nettdokument]*. Helsedirektoratet. <https://www.helsedirektoratet.no/nyheter/helsedirektoratet-utgir-temaveileder-til-utredningsinstruksen>
- Hovi, I.B., Hansen, W., Johansen, B.G., Jordbakke, G.N. & Madslie, A. (2017). Framskrivinger for godstransport i Norge 2016-2050. TØI rapport 1555/2017, Transportøkonomisk institutt (TØI), Oslo.
- Ibenholt, K., Magnussen, K., Navrud, S. & Skjelvik, J. M. (2015). *Marginale eksterne kostnader ved enkelte miljøpåvirkninger*. Vista Analyse. <https://www.regjeringen.no/contentassets/ea2de2ab99474b96b9fe163e0eb7a5a5/va-rapport2015-19.pdf>
- IEA. (2024). *Global Energy and Climate Model: Documentation 2024*. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/89a1aa9a-e1bd-4803-b37b-59d6e7fba1e9/GlobalEnergyandClimateModelDocumentation2024.pdf>
- IPCC. (2018). *Global Warming of 1.5 °C*. <http://www.ipcc.ch/report/sr15/>
- Jansson, J. O. (1994). Accident externality charges. *Journal of Transport Economics and Policy*, 31-43.
- Johansson, P. & Nilsson, J.-E. (2004). An economic analysis of track maintenance costs. *Transport Policy*, 11(3), 277-286.
- Lindberg, G. (2001). Traffic insurance and accident externality charges. *Journal of Transport Economics and Policy (JTEP)*, 35(3), 399-416.
- Lindberg, G. (2005). Measuring the marginal social cost of transport: accidents. *Research in Transportation Economics*, 14, 155-183.
- Lund, J. (2019). Helsevesenbasert skaderegistrering som verktøy for å forebygge trafikkulykker – Status på feltet og forslag til hvordan trafikkulykkesdata kan registreres. Rapport, Trygg Trafikk, Oslo.
- Låg, M., Refsnes, M. & Øvreivik, J. (2017). Vurdering av mulig helserisiko forbundet med høye svevestøvnivåer ved Nationaltheateret stasjon-Oslo. I. Oslo, Norge: Folkehelseinstituttet.

- Madslie, A., Steinsland, C. & Grønland, S. E. (2015). *Nasjonal godstransportmodell. En innføring i bruk av modellen*. (TØI-rapport 1429/2015, Issue. <https://www.toi.no/publikasjoner/nasjonal-godstransportmodell-en-innforing-i-bruk-av-modellen-article33855-8.html>)
- Madslie, A., Kwong, C.K. & Steinsland, C. (2017). Framskrivinger for persontransport i Norge 2016-2050. TØI rapport 1554/2017, Transportøkonomisk institutt (TØI), Oslo.
- Magnussen, K., Bølling, A. K., Låg, M., Refsnes, M., Aasvang, G. M., Rød, M. & Navrud, S. (2019). *Verdsetting Av Luftforurensningens Kostnader For Helse, Miljø Og Materialer – Et Forprosjekt*. <https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/m1573/m1573.pdf>
- Magnussen, K., Ibenholt, K., Skjelvik, J. M., Lindhjem, H., Pedersen, S. & Dyb, V. A. (2015). *Marginale eksterne kostnader ved transport av gods på sjø og bane*.
- Magnussen, K., Navrud, S. & San Martin, O. (2010). Den norske verdsettingsstudien: Verdsetting av tid, sikkerhet og miljø i transportsektoren: Luftforurensning. *TØI-rapport, 1053d/2010*.
- Maibach, M., Schreyer, C., Sutter, D., van Essen, H. P., Boon, B. H., Smokers, R., Schroten, A. & Doll, C. (2008). *Handbook on estimation of external cost in the transport sector Internalisation Measures and Policies for All external Cost of Transport (IMPACT)*
- Miljødirektoratet. (2020). *Grenseverdier for svevestøv: Forslag til reviderte grenseverdier for PM10 og PM2,5*. <https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/m1669/m1669.pdf>
- Miljødirektoratet. (2023). *Klimatiltak i Norge mot 2030: Oppdatert kunnskapsgrunnlag om utslippsreduksjonspotensial, barrierer og mulige virkemidler - 2023*. <https://www.miljodirektoratet.no/publikasjoner/2023/juni-2023/klimatiltak-i-norge-mot-2030/>
- Miljødirektoratet. (2025). *Nitrogenoksider (NOx)*. Hentet 03.11. fra <https://www.miljodirektoratet.no/ansvarsomrader/forurensning/luftkvalitet/lokal-luftkvalitet/nox/>
- Miljødirektoratet, Sjøfartsdirektoratet, Oljedirektoratet, Fiskeridirektoratet, Statens vegvesen & NOx-fondet. (2014). *Tiltaksanalyse NOx 2014* Miljødirektoratet. <http://www.miljodirektoratet.no/no/Publikasjoner/2014/Okttober-2014/Tiltaksanalyse-NOx-2014/>
- Minken, H. & Samstad, H. (2005). *Nyttekostnadsanalyser i transportsektoren: Rammeverk for beregningene*. Transportøkonomisk institutt.
- Murray, C. J., Aravkin, A. Y., Zheng, P., Abbafati, C., Abbas, K. M., Abbasi-Kangevari, M., Abd-Allah, F., Abdelalim, A., Abdollahi, M. & Abdollahpour, I. (2020). Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *The lancet*, 396(10258), 1223-1249.
- Münzel, T., Kröller-Schön, S., Oelze, M., Gori, T., Schmidt, F. P., Steven, S., Hahad, O., Röösli, M., Wunderli, J.-M. & Daiber, A. (2020). Adverse cardiovascular effects of traffic noise with a focus on nighttime noise and the new WHO noise guidelines. *Annual review of public health*, 41, 309-328.
- NOU 2012:16. (2012). *Samfunnsøkonomiske analyser*. Finansdepartementet. Departementenes servicesenter.
- Odolinski, K. & Wheat, P. (2018). Dynamics in rail infrastructure provision: Maintenance and renewal costs in Sweden. *Economics of Transportation*, 14, 21-30.
- Pigou, A. C. (1920). *The economics of welfare*. London, McMillan.
- Plass, D., Hilderink, H., Lehtomäki, H., Øverland, S., Eikemo, T. A., Lai, T., Gorasso, V. & Devleeschauwer, B. (2022). Estimating risk factor attributable burden—challenges and potential solutions when using the comparative risk assessment methodology. *Archives of Public Health*, 80(1), 148.
- Pyko, A., Roswall, N., Ögren, M., Oudin, A., Rosengren, A., Eriksson, C., Segersson, D., Rizzuto, D., Andersson, E. M. & Aasvang, G. M. (2023). Long-term exposure to transportation noise and ischemic heart disease: a pooled analysis of nine Scandinavian cohorts. *Environmental Health Perspectives*, 131(1), 017003.
- Rosendahl, K. E. (2000). *Helseeffekter og samfunnsøkonomiske kostnader av luftforurensning. Luftforurensninger—effekter og verdier (LEVE)*. TA-1718/2000, Oslo: Statens Forurensningstilsyn.

- Rosendahl, K. E. & Wangsness, P. B. (2024). *Review of the Shadow Price of Carbon in the EU [TØI-Report 2037/2024]*. <https://www.toi.no/publikasjoner/gjennomgang-av-karbonpriser-til-bruk-i-analyser-i-eu>
- Rødseth, K. L., Wangsness, P. B. & Gregersen, F. A. (2024). Panel data analysis of drivers under an evolving cordon tolling system. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 179, 103919.
- Rødseth, K. L., Wangsness, P. B., Veisten, K., Elvik, R., Høye, A. K., Klæboe, R., Thune-Larsen, H., Fridstrøm, L., Lindstad, E., Rialland, A., Odolinski, K. & Nilsson, J.-E. (2020). *Eksterne skadekostnader ved transport i Norge - Estimer av marginale skadekostnader for person- og godstransport [TØI-rapport 1704/2019]* (TØI-Rapport 1704/2019, Issue. <https://www.toi.no/publikasjoner/eksterne-skadekostnader-ved-transport-i-norge-estimer-av-marginale-skadekostnader-for-person-og-godstransport-article35997-8.html> [in Norwegian]
- Samstad, H., Ramjerdi, F., Veisten, K., Navrud, S., Magnussen, K., Flügel, S., Killi, M., Halse, A., Elvik, R. & Martin, O. (2010). Den norske verdsettingsstudien. *Sammendragsrapport. TOI rapport*, 1053, 2010.
- Schiavina, M., Freire, S. & MacManus, K. (2023). GHS-POP R2023A—GHS population grid multitemporal (1975–2030). European Commission, Joint Research Centre (JRC)[data set]. I.
- SFT. (2005). *Marginale miljøkostnader ved luftforurensning - Skadekostnader og tiltakskostnader*. SFT. <http://www.miljodirektoratet.no/old/klif/publikasjoner/luft/2100/ta2100.pdf>
- SHT. (2009). *Rapport om sammenstøt mellom arbeidstog 59007 og tog 9909 på Katterat stasjon onsdag 25.02.2009 [Rapport JB 2009/10]*.
- SHT. (2011). *Rapport om jernbaneulykke med vognstamme i utilsiktet drift fra Alnabru til Sydhavna 24. mars 2010 [Rapport JB 2011/03]*.
- SSB. (2021, 9.12.2021). *Flere utsatt for støy ved boligen [nettdokument]*. Hentet 31.01.2022 fra <https://www.ssb.no/natur-og-miljo/artikler-og-publikasjoner/flere-utsatt-for-stoy-ved-boligen>
- Statens vegvesen. (2014). *Håndbok V712 – Konsekvensanalyser*. S. v. N. P. R. Authority].
- Statens vegvesen. (2021). *Håndbok V172 Konsekvensanalyser*. S. v. Vegdirektoratet. Norwegian Public Roads Administration. <https://www.vegvesen.no/globalassets/fag/handboker/hb-v712-konsekvensanalyser-2021.pdf>
- Statistisk Sentralbyrå. (2021). *Emission factors used in the estimations of emissions from combustion*. <https://www.toi.no/getfile.php?mmfileid=52408>
- Sørensen, M., Pershagen, G., Thacher, J. D., Lanki, T., Wicki, B., Röösli, M., Vienneau, D., Cantuaria, M. L., Schmidt, J. H. & Aasvang, G. M. (2024). Health position paper and redox perspectives-Disease burden by transportation noise. *Redox biology*, 69, 102995.
- Thune-Larsen, H., Veisten, K., Rødseth, K. L. & Klæboe, R. (2014). *Marginale eksterne kostnader ved vegtrafikk med korrigerte ulykkeskostnader (1307/2014)*. (TØI rapport, Issue. Institute of Transport Economics. <https://www.toi.no/getfile.php?mmfileid=38978>
- Van Kempen, E., Casas, M., Pershagen, G. & Foraster, M. (2018). WHO environmental noise guidelines for the European region: a systematic review on environmental noise and cardiovascular and metabolic effects: a summary. *International journal of environmental research and public health*, 15(2), 379.
- Veisten, K., Flügel, S. & Elvik, R. (2010). Ulykker–Verdien av statistiske liv og beregning av ulykkenes samfunnskostnader. *TØI-rapport 1053C*.
- Veisten, K. (2025). Eksterne kostnader ved materielle skader i ulykker som involverer tog, 2025. TØI arbeidsdokument 52223/2025, Transportøkonomisk institutt (TØI), Oslo.
- Veisten, K., Høye, A.K. & Elvik, R. (2025a). Eksterne kostnader ved personskade i ulykker som involverer tog, 2025. TØI arbeidsdokument 52221/2025, Transportøkonomisk institutt (TØI), Oslo.
- Veisten, K., Høye, A.K. & Elvik, R. (2025b). Eksterne kostnader av personskader i jernbane- og vegtransportulykker – sammenlikning med estimer korrigert for underrapportering, 2025. TØI arbeidsdokument 52222/2025, Transportøkonomisk institutt (TØI), Oslo.

- Vickrey, W. (1968). Automobile accidents, tort law, externalities, and insurance: An economist's critique. *Law and Contemporary Problems*, 33(3), 464-487.
- Wangsness, P. B., Rødseth, K. L., Thune-Larsen, H. & Ellingsen, L. A.-W. (2023). Eksterne kostnader fra godstransport på veg og til sjøs-Oppdaterte estimater av marginale skadekostnader - 2022 *TØI-Rapport 1953/2023*
- <https://www.toi.no/publikasjoner/eksterne-kostnader-fra-godstransport-pa-veg-og-til-sjos-oppdater-te-estimer-av-marginale-skadekostnader-2022>
- WHO. (2011). Burden of disease from environmental noise: Quantification of healthy life years lost in Europe. I *Burden of disease from environmental noise: Quantification of healthy life years lost in Europe*.
- WHO. (2018). Environmental noise guidelines for the European region. *World Health Organisation Regional Office for Europe, Copenhagen*.
- World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. *World Health Organization*.
- Aasvang, G. M., Stockfelt, L., Sørensen, M., Turunen, A. W., Roswall, N., Yli-Tuomi, T., Ögren, M., Lanki, T., Selander, J. & Vincens, N. (2023). Burden of disease due to transportation noise in the Nordic countries. *Environmental Research*, 231, 116077.

TØI er et anvendt forskningsinstitutt som mottar basisbevilgning fra Norges forskningsråd og gjennomfører forsknings- og utredningsoppdrag for næringsliv og offentlige etater. TØI ble opprettet i 1964 og er organisert som uavhengig stiftelse.

TØI utvikler og formidler kunnskap om samferdsel med vitenskapelig kvalitet og praktisk anvendelse. Instituttet har et tverrfaglig miljø med rundt 90 høyt spesialiserte forskere.

Instituttet driver forskningsformidling gjennom TØI-rapporter, artikler i vitenskapelige tidsskrifter, bøker, seminarer, samt innlegg og intervjuer i media. TØI-rapportene er gratis tilgjengelige på instituttets hjemmeside www.toi.no.

TØI dekker alle transportmidler og temaområder innen samferdsel, inkludert trafiksikkerhet, kollektivtransport, klima og miljø, reiseliv, reisevaner og reiseetterspørsel, arealplanlegging, ITS, offentlige beslutningsprosesser, næringslivets transportbehov og generell transportøkonomi. Instituttet deltar aktivt i internasjonalt forskningssamarbeid, med særlig vekt på EUs rammeprogrammer.

Transportøkonomisk institutt krever opphavsrett til egne arbeider og legger vekt på å opptre uavhengig av oppdragsgiverne i alle faglige analyser og vurderinger.

Postadresse:

Transportøkonomisk institutt
Postboks 8600 Majorstua
0349 Oslo
Norge

Kontoradresse:

Forskningsparken
Gaustadalléen 21

E-post: toi@toi.no

Hjemmeside: www.toi.no

