

Direkte kostnader

METODIKK OG BEREGNINGER AV DIREKTE KOSTNADER FOR
PRISING AV DEN MINSTE PAKKEN MED TJENESTER

Direkte kostnader

1 Innhold

1	Innhold.....	1
2	Innledning.....	3
3	Regelverk.....	3
3.1	Generelt.....	3
3.2	Differensiering av gjennomsnittlige enhetskostnader.....	3
4	Prismodell.....	4
4.1	Fremgangsmåte.....	4
4.1.1	Avgrensning av kostnadsgrunnlag.....	5
4.1.2	Valg av beregningsmetode.....	6
4.1.3	Veien videre.....	7
4.2	Data.....	7
4.2.1	Kostnadsdata.....	7
4.2.2	Tekniske data.....	7
4.2.3	Trafikkdata.....	7
4.2.4	Prisindeks.....	8
4.2.5	Datasett.....	8
4.2.6	Svakheter ved dataene.....	9
4.2.7	Andre utfordringer knyttet til data.....	10
4.3	Modell og vurderinger.....	10
4.3.1	Forutsetninger for regresjonsmodellen.....	11
4.3.2	Valg av funksjonsform.....	11
4.3.3	Vurdering av hvilke variabler som skal inngå i modellen.....	12
4.3.4	Differensiering mellom baneområder.....	12
4.3.5	Mål på trafikken.....	14
4.3.6	Valgt modell.....	15
4.3.7	Resultater av regresjonsmodellen.....	16
4.4	Resultater uten differensiering utfra aksellast.....	16
5	Differensiering av prisen basert på aksellast.....	17
5.1	Sammenheng mellom aksellast og slitasje i Norge.....	17

Metodikk og beregninger av direkte kostnader

5.2	Dokumentasjon	17
5.2.1	Ekspertvurderinger	18
5.2.2	Lærebøker i jernbaneteknikk	18
5.2.3	Samfunnsøkonomisk analyse	18
5.2.4	Målevogndata.....	19
5.2.5	Oppdatert regresjonsanalyse	19
5.2.6	Andre land	20
5.3	Terskelverdi høy og lav aksellast	20
5.4	Beregninger	20
5.5	Resultater	21
6	Implementering og anbefalinger	21
7	Bibliografi	22
8	Vedlegg A – Begreper og uttrykk.....	24
9	Vedlegg B – vurdering av funksjonsformer	24
10	Vedlegg C – Regresjonsresultater ulike modeller	26
11	Vedlegg D – modell med og uten tidstrend	27
12	Vedlegg E – tester av modellen	28

2 Innledning

Prisene for den minste pakken med tjenester¹ ble revidert til Network Statement 2024. Til Network Statement 2025 vil det være en videreutvikling av modellen for å gjøre den mer treffsikker. Grunnprisen vil differensieres basert på aksellast, med et forbehold om at Statens Jernbanetilsyn godkjenner en slik differensiering. Dersom en slik differensiering ikke blir godkjent, vil modellen fra NS2024 videreføres. Denne rapporten omhandler datagrunnlag, metode, resultater og generelt hvilke vurderinger som ble gjort i beregningen av ny grunnpris².

I kapittel 3 kommer en kort gjennomgang av regelverket, i kapittel 4 blir prismodellen beskrevet i detalj, i kapittel 5 vil det redegjøres for en differensiering av prisen basert på aksellast, mens resultater presenteres i kapittel 5.5.

3 Regelverk

3.1 Generelt

Jernbaneforskriften § 6-2 (1) sier at «Avgiftene for bruk av tjenester nevnt i § 4-1 og for tilgang til jernbaneinfrastruktur som knytter sammen serviceanlegg, skal fastsettes til kostnaden som oppstår som en direkte følge av den enkelte togtjenesten. Avgiftene kan endres som angitt i annet og tredje ledd og § 6-3».

Jernbaneforskriften beskriver regler for både hvordan kapasitetsfordelingen og prisingen av infrastrukturtenestene som Bane NOR tilbyr, skal gjennomføres. Forskriften bygger på EU-direktiv 2012/34, og angir at prisen for den minste pakken med tjenester skal settes til de direkte kostnadene knyttet til produksjonen av tjenesten. EU har i tillegg kommet med en forordning (EU 2015/909) (forordningen) som gir nærmere føring for hvordan de direkte kostnadene skal beregnes.

Forordningen åpner i artikkel 6 for at infrastrukturforvalter kan benytte følgende metoder til å beregne direkte enhetskostnader: aktivitetsbasert kostnadskalkyle (forordningsmetoden), økonometrisk metode, teknisk kostnadsmodellering, eller en kombinasjon av disse.

I artikkel 2 (2) står det at «direkte enhetskostnad» er direkte kostnad per togkilometer, kjøretøykilometer, et togs bruttotonnkilometer eller en kombinasjon av disse.

3.2 Differensiering av gjennomsnittlige enhetskostnader

I artikkel 5 (1) i forordning 2015/909 står det at man kan ha ulikt nivå på grunnprisen på ulike deler av jernbanenettet dersom man kan godtgjøre overfor reguleringsorganet at de direkte kostnadene er svært ulike.

Under artikkel 5 (2) i forordning 2015/909 åpnes det for å differensiere de direkte kostnadene basert på ulike parametere som kan påvirke slitasjonen på infrastrukturen. Her nevnes blant annet masse, aksellast, hastighet og toglengde m.m.

¹ Den minste pakken med tjenester er definert i jernbaneforskriften § 4-1

² Pris for den minste pakken med adgangstjenester og for adgang til infrastruktur som knytter sammen serviceanlegg, i samsvar med artikkel 31 nr. 3 i direktiv 2012/34. Prisen skal fastsettes til kostnaden som oppstår som en direkte følge av driften av togtjenesten (direkte kostnad).

4 Prismodell

4.1 Fremgangsmåte

Beregning av de direkte trafikkavhengige kostnadene ved minstepakken gjøres i flere trinn, som illustrert i Figur 1.



Figur 1 Fremgangsmåte for beregning av direkte trafikkavhengige kostnader

Dersom en velger økonometrisk metode, som vi mener er mest hensiktsmessig, foreslår IRG-Rail i en rapport fra 2016 følgende fremgangsmåte for å estimere direkte kostnader:

Metodikk og beregninger av direkte kostnader

Step	Aim	Description
1 a	Collect data on costs	<ul style="list-style-type: none"> - Cost data on operation, maintenance and renewal costs - A preferred approach is to disaggregate these costs by type - Should be collected at the network section level, for at least one year - Identifiable fixed and non-eligible costs may be excluded from the cost base
1 b	Collect data on traffic	<ul style="list-style-type: none"> - Should be collected at the same observation unit as costs, for the same period - Usually expressed in tonne-km or train-km and a preferred approach is to collect data on each traffic type
1 c	Collect other data	<ul style="list-style-type: none"> - Collect data on infrastructure characteristics (e.g. number of tracks, type of rail, age of different components) at the same level as cost and traffic data - Additional data such as the different climates or regions can also be collected
2	Assemble datasets	<ul style="list-style-type: none"> - Data on costs, traffic and infrastructure characteristics should be merged into a single dataset to enable econometric estimations
3	Econometric estimation	<ul style="list-style-type: none"> - Estimate econometric models where the dependent variables are the types of costs, the variables of interest are the traffic types and control variables include for instance infrastructure characteristics, climate and region variables
4a	Derive elasticity	<ul style="list-style-type: none"> - From the results of the econometric model, it is possible to estimate the elasticity of costs to traffic - The elasticity represents the percentage of costs that vary with the level of traffic.
4b	Calculate marginal costs	<ul style="list-style-type: none"> - Marginal costs should then be calculated. They represent the costs per unit of traffic considered (e.g., per train-km or (gross)tonne-km) - If an elasticity has already been derived then the marginal costs may be calculated as elasticities times average costs

Figur 2 Estimering av direkte kostnader ved bruk av en økonometrisk metode

Det er denne fremgangsmåten Bane NOR har tatt utgangspunkt i ved beregningen av direkte kostnader.

4.1.1 Avgrensning av kostnadsgrunnlag

De direkte kostnadene er en del av kostnadene for kjernevirksomheten. I beregningen er det kun tatt hensyn til kostnader knyttet til produksjon av den minste pakken med tjenester og ikke kostnader som oppstår som følge av produksjon av tjenester i serviceanlegg, tilleggstjenester og ekstratjenester. Det er kun de trafikkavhengige kostnadene (direkte kostnader) som skal inngå grunnprisen.

I forordning 2015/909 artikkel 3 (4) nevnes det eksempler på hvilke typer kostnader som kan inkluderes i de direkte kostnadene, dersom infrastrukturforvalter «*på en åpen, utfyllende og objektiv måte, blant annet på grunnlag av beste internasjonale praksis, kan fastsette kostnader og godtgjøre at de er oppstått som en direkte følge av driften av tog-tjenesten*». Bane NOR har lagt til grunn kun vedlikeholdskostnader i de direkte kostnadene. Andre land har også inkludert kostnader til fornyelse, avskrivninger, ruteplanlegging og trafikkstyring i sine direkte kostnader, og Bane NOR har også tidligere vurdert dette. Når det gjelder trafikkstyring eller ruteplanlegging er det en stor andel faste kostnader. Fornylses- og avskrivningskostnadene påvirkes nok i større grad av trafikken. I mangel av en metode der man klart kan dokumentere at kostnadene oppstår som en direkte følge av togtrafikken har vi likevel besluttet å ikke ta med dette i modellen.

Metodikk og beregninger av direkte kostnader

4.1.2 Valg av beregningsmetode

Neste trinn er valg av overordnet beregningsmetode. I artikkel 6 i forordning 2015/909 åpnes det for å beregne de direkte trafikkavhengige kostnadene ved minstepakken ved hjelp av følgende metoder:

- Aktivitetsbasert kostnadskalkyle (forordningsmetoden): Totale kostnader ved å tilby minstepakken, fratrukket ikke-kvalifiserte kostnader.
- Teknisk kostnadsmodellering (ingeniørmetoden)
- Økonometrisk metode

Ved bruk av den førstnevnte metoden, som vi har kalt forordningsmetoden, trekker man fra ikke-kvalifiserte kostnader i henhold til artikkel 4 i forordningen. I mange tilfeller vil dette innebære stor grad av skjønn når det gjelder å avgjøre i hvilken grad de ulike typene kostnader er trafikkavhengige eller ikke. Skjønnsbaserte vurderinger kan være utfordrende å dokumentere på en etterprøvbar måte.

Ingeniørmetoden kan for det første bestå av modeller for fysiske sammenhenger, for eksempel mellom trafikk med ulike togtyper og slitasje på ulike kategorier av infrastruktur. For det andre kan metoden innebære ulike måter å knytte kostnader til slitasjen – for eksempel ved å multiplisere slitasjemål med enhetskostnader, eller allokere kostnader fra regnskapsdata ut på de identifiserte driverne. På denne måten finner man estimater for trafikkavhengige kostnader per enhet, for eksempel vedlikeholdskostnader per togkilometer. I prosessen er man avhengig av både gode data og ekspertvurderinger.

Med økonometrisk metode baseres estimeringen av trafikkavhengige kostnader i stor grad på statistikk og blir enklere å etterprøve kvantitativt. Men det kreves også jernbanefaglige vurderinger for å spesifisere en god økonometrisk modell for hvordan kostnadene varierer med ulike forklaringsvariabler. Det er også viktig med god kvalitet på datasettet.

Det er styrker og svakheter ved både ingeniørmetoden og økonometrisk modellering. Smith et al. (2017) beskriver en tottrinnsmetode hvor teknisk og økonomisk modellering kombineres. Metoden er svært kompleks med hensyn til data og modellering. Bane NORs divisjon for Drift og teknologi arbeider med å være stadig mer datadrevet slik at for eksempel vedlikehold skal være basert på data om infrastrukturens tilstand på et avansert nivå. Det ville likevel være krevende å etablere en modell i tråd med opplegget fra Smith et al. Det er en mulighet som kan bli mer realistisk i framtidige revisjoner av infrastrukturavgiftene.

I denne analysen har vi valgt å gå videre med økonometrisk metode. Etter vår vurdering er det den metoden som i minst grad baseres på skjønn. Datasettet alene kan likevel ikke være det eneste man baserer seg på i etableringen av en økonometrisk modell. Modellutformingen har derfor skjedd i dialog mellom økonomer og jernbanefaglig kompetanse³. Professor Nils Henrik Von der Fehr ved Universitet i Oslo har kommet med nyttige innspill om regresjonsanalysen og hensyn som må tas i beregningen av ny grunnpris. I arbeidet med beregning av grunnpris i 2021 fikk Bane NOR flere tilbakemeldinger fra Statens jernbanetilsyn og professor Christian Riis ved BI, og det er forsøkt å hensynta også disse innspillene. Joanna Kiepiela som jobber med asset management i Bane NOR og har god kunnskap om forholdet mellom kostnader og vedlikehold i jernbanen har bidratt i mer prinsipielle jernbanefaglige spørsmål.

³ Arbeidet som er gjort og resultatene som fremgår er helt og holdent Bane NOR sitt ansvar

4.1.3 Veien videre

Valget av økonometrisk metode fører oss til de neste trinnene i fremgangsmåten i Figur 1.

- Valg av funksjonsform (kapittel 4.3.2). Eksempler på funksjonsformer i økonometriske analyser er dobbel-log, translog og kvadratisk form. Dette er ulike former for å modellere sammenhengen mellom på den ene siden kostnader og på den andre siden ulike forklaringsvariabler. Rent jernbanefaglig gir det mening å bruke en dobbel-log-modell. Det er enkelt å tolke resultatene, og modellen tar hensyn til skjevheter mot store verdier i datamaterialet.
- Valg av variabler (kapittel 4.3.3). I tillegg til togtrafikken vil det være andre variabler som bidrar til å forklare variasjon i kostnader. Eksempler på mulige kandidater er tekniske variabler som tunneler, bruer, sporveksler, plattformer, kurvatur og hastighet. Andre typer forklaringsvariabler kan være regioner (gruppering av banestrekninger), vektclasser eller togslag (gods- og persontog). Hvor lang banen er vil i stor grad påvirke vedlikeholdet. Banelengden vil også være en god indikator for størrelsen på de andre tekniske variablene. Den viktigste forklaringsvariabelen i tillegg til togtrafikken er dermed sporenlengde.
- Valg av mål på trafikken, det vil si valg av enhet (kapittel 4.3.5). Kostnadene kan for eksempel uttrykkes som kroner per togkilometer, bruttotonnkilometer, brutto tonn eller antall tog.
- Tester (Vedlegg E – tester av modellen) for å vurdere kvaliteten på resultatene av den økonometriske analysen.

4.2 Data

Beregningene bygger på et paneldatasett bestående av kostnadsdata, trafikkdata og tekniske data for 26 banestrekninger over de 5 årene 2017-2021⁴.

4.2.1 Kostnadsdata

Det er forebyggende og korrektivt vedlikehold som inngår i vedlikeholdskostnadene. Dataene er hentet fra Bane NORs regnskapssystem.

I forordningen er det under artikkel 4 listet opp kostnadselementer som ikke er kvalifiserte som direkte kostnader, og som dermed ikke skal være med i grunnprisen. Dette er hensyntatt i uttaket av kostnadsdata, ved at f.eks. finanskostnader og overhead-kostnader ikke er inkludert.

4.2.2 Tekniske data

Ved bruk av tekniske data i analysen får man tatt hensyn til hvordan infrastrukturens utforming påvirker marginalkostnadene. De tekniske dataene er hentet fra TRASÉ⁵. Dataene er fordelt på banestrekninger. Vi har måttet ta utgangspunkt i dataene slik de foreligger, selv om vi kunne ønsket oss mer eller bedre data.

4.2.3 Trafikkdata

Produksjonsvolumet er målt gjennom faktisk kjørte brutto tonnkilometer, togkilometer og gjennomsnittlig vekt registrert i TIOS⁶ og DRAGE⁷ totalt og for henholdsvis persontog, godstog og andre

⁴ Datakvaliteten er bedre i disse årene enn de har vært tidligere. Helst skulle vi hatt en lengre tidsserie, og ved neste revisjon av prisene vil analysen kunne inkludere flere år.

⁵ Gir informasjon om jernbaneinfrastrukturen

⁶ Bane NORs Trafikkinformasjons- og oppfølgingssystem

⁷ DRAGE = Data, Rapport og Analyse Generator og er Bane NORs datavarehus for oppfølging av punktlighet, økonomi og beregning av infrastrukturavgifter

tog. Vi har også data på gjennomsnittlig faktisk aksellast per bane i 2020. Alle variablene er fordelt på banestrekning.

4.2.4 Prisindeks

Siden datasettet består av kostnader i løpende priser for forskjellige år, må det justeres for ulikt prisnivå. Dette tas hensyn til gjennom å enten inkludere en prisindeks som kontrollvariabel eller justere vedlikeholdskostnadene med prisindeksen direkte for å få kostnadene i faste priser. Det er ikke rett frem hva man skal bruke som mål på prisveksten. Det vanlige i Europa når det kommer til årlig prisjustering av infrastrukturavgiftene er å enten bruke konsumprisindeksen eller kostnadsindekser for jernbane eller lignende tjenester. Siden 2021 har prisene i Bane NORs avtaler med Spordrift⁸ blitt justert med SSBs prisindeks for drift og vedlikehold av veger. Det er naturlig å anta at det er sammenheng mellom prisene knyttet til drift og vedlikehold av veger og av jernbane. Kostnadsindeksen måler prisutviklingen på innsatsfaktorene materialer, maskiner og arbeidskraft. Dette er antagelig mer relevant for vedlikeholdskostnadene i Bane NOR enn f.eks. konsumprisindeksen som beskriver utviklingen i konsumpriser for varer og tjenester etterspurt av private husholdninger. I mangel av en egen kostnadsindeks knyttet til av jernbane, er det normal praksis å bruke kostnadsindeksen for veger i prosjekter som omhandler jernbane. Så selv om bruk av prisindeksen i kontraktene med Spordrift ble innført etter analyseperioden vi ser på, er indeksen et godt mål på vedlikeholdskostnadene for jernbane i Norge.

4.2.5 Datasett

Kostnadsdata, trafikkdata og tekniske data på strekningsnivå, samt prisindeks ble samlet i et datasett. Vedlikeholdskostnadene i 2021-kroner inngikk i modellen som avhengig variabel, mens følgende uavhengige variabler var tilgjengelige i datasettet, og det ble vurdert om de var relevante eller ikke å inkludere i modellen.

Tabell 1 Datasett

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

⁸ Totalleverandør innen drift og vedlikehold av banerelatert infrastruktur i Norge

Trafikkdata

Antall avganger

Brutto tonn

Aksellast

Gjennomsnitt per banestrekning

Prisindeks og tidstrend

SSBs prisindeks for drift og vedlikehold av
veger

Tidstrend

4.2.6 Svakheter ved dataene

På noen områder er datasettet bedre nå enn ved tidligere analyser. Blant annet har flere analyser tidligere brukt planlagt trafikkarbeid som mål på trafikken⁹, mens vi i dag har gode data for faktisk trafikkarbeid. Likevel er det fortsatt noen svakheter ved datasettet.

Antall observasjoner

Datasettet består av totalt 130 observasjoner, med 5 år og 26 banestrekninger. I tillegg utelates tre observasjoner i modellen siden det er år med ingen trafikk på enkelte banestrekninger. Det at det ikke er flere datapunkter begrenser mulighetene en har i den økonometriske modellen. Med få observasjoner må man begrense hvor mange variabler som brukes i modellen. Jo flere variabler en har med når man har få observasjoner, desto mindre vil de ekstra variablene bidra til å forbedre modellen.

Kostnadsdata

En svakhet ved datasettet er at ikke alle vedlikeholdskostnadene er fordelt på banestrekning. Noen kostnader er fordelt på banesjefs-nivå, mens en liten andel ikke er fordelt i det hele tatt. I disse tilfellene er kostnadene fordelt proporsjonalt med antall kilometer sporelengde.

Det har både vært en omlegging av økonomisystemet og en stor omorganisering i analyseperioden, noe som har medført koblingsutfordringer. Regnskapsmedarbeidere har bistått i arbeidet for å få så konsistente data over tid som mulig.

Regnskapsdataene er ikke laget med formålet om å beregne priser. Det er igangsatt et prosjekt i Bane NOR for å bl.a. få en bedre fordeling av kostnader på geografi og aktiviteter fremover. Dette vil forhåpentligvis gjøre at vi får forbedrede data ved neste revisjon av prisene.

Kobling av data

For å få et samlet datasett er det benyttet flere datakilder, noe som har skapt noen utfordringer. I hovedsak gjelder dette den geografiske inndelingen, som er ulik for trafikkdata og økonomiske data. Dette har ført til at vi har endt opp med færre observasjoner enn hva som kunne vært mulig ellers. Det er etablert et masterdatateam i Bane NOR for å få en bedre struktur og kvalitet på masterdata. Dette vil antagelig gjøre slike koblinger av data enklere fremover.

⁹ Jernbaneloggen 2014

Metodikk og beregninger av direkte kostnader

4.2.7 Andre utfordringer knyttet til data

Det kan være kollinearitet/multikollinearitet mellom forklaringsvariablene, dvs. at det eksisterer en lineær sammenheng mellom variablene. Når en undersøker korrelasjon mellom variablene som potensielt kan inkluderes i modellen er det tydelig at dette er en utfordring. Dette kommer tydelig frem i korrelasjonsmatrisen i tabell 2, der det i noen tilfeller er en korrelasjon på opp mot 0,9. Sporlengde er en viktig forklaringsvariabel for kostnader, og denne er derfor viktig å inkludere i modellen. Både antall sporveksler, plattformlengde, meter med bru og meter med tunnel er høyt korrelert med sporlengde. En måte å omgå dette problemet på er å inkludere variablene som andeler av sporkilometer. Det ble kjørt modeller med denne spesifiseringen, men resultatet ble koeffisienter som var ikke-signifikante og hadde motsatt fortegn enn hva som gir mening jernbanefaglig. Dette taler imot å inkludere disse variablene.

Tabell 2 Korrelasjon mellom variabler

	Km	Tunell	Bru	Antall tog	Sporveksel	plattform	kurvatur
Km	1						
Tunell	0,7442	1					
Bru	0,7368	0,6134	1				
Antall tog	-0,0842	0,0668	0,2826	1			
Sporveksel	0,8921	0,6703	0,8666	0,1251	1		
Plattform	0,8434	0,6787	0,8562	0,1691	0,9645	1	
Kurvatur	0,6125	0,5367	0,3231	-0,1492	0,5348	0,476	1

Tabell 3 Korrelasjon mellom variabler, med andeler

	Km	Tunnelandel	Bruandel	Antall tog	Sporveksel	Plattformandel	kurvatur
Km	1						
Tunnelandel	0,0241	1					
Bruandel	-0,206	0,1201	1				
Antall tog	-0,0842	0,3586	0,4854	1			
Sporveksel	0,8921	0,0751	0,0209	0,1251	1		
Plattformandel	-0,0938	0,2355	0,3487	0,6206	0,1418	1	
Kurvatur	0,6125	0,1698	-0,2854	-0,1492	0,5348	-0,1203	1

4.3 Modell og vurderinger

Målet med den økonometriske metoden er å måle vedlikeholdskostnadene som en funksjon av trafikken, der det kontrolleres for diverse karakteristikker ved jernbanenettet. I estimeringen av direkte kostnader har Bane NOR blant annet testet ulike funksjonsformer og forskjellige mål på

trafikkbelastning for å finne den modellen som best forklarer variasjonen i vedlikeholdskostnadene. Beregningene er gjort med bruk av statistikkpakken STATA.



Figur 3 Sammenheng mellom antall tog/togkilometer og vedlikeholdskostnader

Modellen bygger på en forutsetning om at sammenhengen illustrert i Figur 3 er sann. Blant annet har eksperter i Bane NOR på sammenheng mellom vedlikehold og kostnader bekreftet både at antall tog påvirker slitasjen på infrastrukturen og at slitasjen på infrastrukturen er en viktig del av det som bestemmer vedlikeholdet og dermed vedlikeholdskostnadene. I tillegg kommer det frem i resultatene av den statistiske analysen at det også er signifikant statistisk sammenheng.

4.3.1 Forutsetninger for regresjonsmodellen

I estimeringen av regresjonsmodellen brukes minste kvadraters metode. Denne metoden går ut på å minimere «avstanden» mellom observasjonspunktene og den estimerte linja. Man minimerer altså residualleddene gitt ved:

$$Q = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - a - bx_i)^2$$

Der Q er det vi ønsker å minimere ved å estimere a og b, e_i er residualledd for observasjon i, $Y_i = a + bx_i$ er regresjonslinja der Y_i er avhengig variabel, a konstant, b stigningstallet og x_i er uavhengig variabel. I ligningen over er det kun en forklaringsvariabel, men det samme prinsippet gjelder i en multipl regressjonsmodell.

Det er noen forutsetninger som bør være oppfylt for å kunne bruke en regresjonsmodell med minste kvadraters metode:

- Lineær sammenheng mellom variablene
- Residualleddene skal ha konstant varians (homoskedastisitet)
- Residualleddene skal være normalfordelte
- Residualleddene skal være uavhengige (ingen autokorrelasjon)

I Vedlegg E – tester av modellen undersøkes det om disse forutsetningene er oppfylt.

4.3.2 Valg av funksjonsform

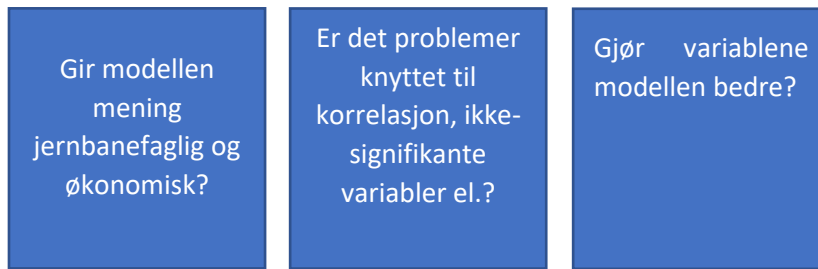
De mest vanlige tilnæringsmetodene i beregningen av marginalkostnader for jernbanen er bruk av translog eller dobbel-log funksjoner¹⁰. I realiteten innebærer disse funksjonsformene at man estimerer enten marginalkostnadene eller kostnadselastisiteten uavhengig av de tekniske og fysiske sammenhengene. Rent jernbanefaglig gir det mening å bruke en dobbel-log-modell. Det er enkelt å tolke resultatene, og modellen tar hensyn til skjevheter mot store verdier i datamaterialet.

For mer informasjon om vurdering av funksjonsform, se Vedlegg B – vurdering av funksjonsformer.

¹⁰ Se f.eks. tabell 14 i Catrin 2008.

4.3.3 Vurdering av hvilke variabler som skal inngå i modellen

I Figur 4 vises noen av vurderingene Bane NOR har tatt i spesifiseringen av modellen.



Figur 4 Vurdering av variabler

Hvilke variabler kan være relevante å inkludere?

Tekniske variabler

Jernbanefaglig kan det være relevant å inkludere alle de tekniske variablene som er listet opp i tabell 1.

Som det fremkommer i kapittel 4.2.6 er det utfordringer knyttet til å inkludere de tekniske variablene. Det er høy korrelasjon mellom variablene, og dette taler imot å inkludere flere av de tekniske variablene.

Tidstrend

Det kan være forhold utenfor modellen som utvikler seg over tid og påvirker den avhengige variabelen. Det ble testet modeller der en trendvariabel/tidsindeks ble inkludert i modellen¹¹. Trendvariabelen kan brukes som en proxy på en variabel som påvirker den avhengige variabelen og som ikke er direkte observerbar, men som er høyt korrelert med tiden. Det å inkludere en tidstrend gjorde nokså små utslag på de andre koeffisientene, og en sammenligning av modellene i STATA viste at det å inkludere en tidstrend gjorde modellen dårligere. Se resultat av sammenligningen i Vedlegg D – modell med og uten tidstrend.

Tidsforskyvning

Det ble vurdert om en burde ha med en tidsforskyvning i datasettet. Dersom kostnadene i år t i stor grad avhenger av kostnadene/trafikken i år $t-1$, vil dette være lurt å kontrollere for. Ekspertene i Bane NOR mener imidlertid at dette ikke er tilfellet. I tillegg vil man miste et helt år med observasjoner dersom man velger å ta det med. Derfor falt valget på å ikke inkludere noen tidsforskyvning i modellen.

4.3.4 Differensiering mellom baneområder

Ved å dele banestrekningene inn i regioner, kan man både hensynte at det er ulike kostnadsnivåer og man får indirekte justert for at det forskjeller i de tekniske variablene uten å ta med disse direkte i modellen. I tillegg kan man få med ikke-observerbare forskjeller mellom regionene.

Ved å dele banestrekningene inn i regioner ble det undersøkt om det var signifikante forskjellige nivåer på vedlikeholdskostnadene eller ulik sammenheng mellom trafikk og vedlikeholdskostnader i forskjellige regioner ved å dele banestrekningene inn i regioner.

¹¹ <http://www.econometrics.com/intro/trend.htm>

Valg av inndeling

Det er to kriterier som er lagt til grunn ved valg av baneinndeling:

- Det må være en sammenheng mellom banene som er gruppert sammen som skulle tilsi at det også er likheter i marginalkostnadsnivå (analyseres før regresjonsanalysen)
- Det må være signifikante resultater slik at vi med en overveiende sannsynlighet kan si at det er reelle forskjeller i marginalkostnader mellom baneområdene (analyseres etter regresjonsanalysen)

Det ble undersøkt om det er noen karakteristikk ved banene som gjorde at det var en naturlig inndeling i baneområder. Følgende variabler ble vurdert:

Tabell 4 Variabler brukt i vurderingen av baneområder

Gjennomsnittskostnader	Kroner per km
Brutto tonn	Per km
Antall tog	Per km
Sporveksler	Antall per km
Plattformlengde	Meter per km
Tunnellengde	Meter per km
Brulengde	Meter per km
Kurvatur	Antall kurver under <300 meter per km
Hastighet	Gjennomsnitt
Aksellast	Tillatt antall tonn per aksel
Overbygningssklasse	4 klasser

For hver banestrekning ble det gjort en vurdering av variablene i Tabell 4, som gjorde at vi endte opp med en inndeling som ga mening. Inndelingen ble som følger:

- Osloområdet
- Ofofbanen
- Andre baner

Banene i Osloområdet og Ofofbanen skiller seg ut fra de andre banene særlig når det kommer til kostnadsnivå og trafikk. Som det kommer frem i Tabell 5, har baneområdene Osloområdet og Ofofbanen også høye verdier på de tekniske variablene. Strekningene i Osloområdet består av relativt rette strekninger med mange meter med bru og plattform per km. Baneområdet Ofofbanen består kun av en relativt kort banestrekning. At det likevel blir et eget baneområde skyldes at Ofofbanen skiller seg såpass mye ut fra de andre banestrekningene. Det er den eneste banen med tillatt aksellast på 31 tonn, det fraktes mye tonnasje per km og det kreves høye kostnader for å vedlikeholde banen. Ofofbanen er også blant strekningene med høyest antall tunellmeter og mest kurvatur. I tillegg er banen adskilt fra resten av nettet geografisk, noe som gjør at Bane NOR har god oversikt over vedlikeholdskostnadene knyttet til banestrekningen.

Vi prøvde blant annet også å kjøre en modell der andre baner ble delt i to basert på nivået på kostnader, trafikk og tekniske parametere. Det viste seg at dette ikke ga signifikante resultater.

Tabell 5. GjennomsnittsvARIABLER for hvert baneområde

	Osloområdet	Oftobanen	Resten
Gjennomsnittskostnad per km	636 621	1 003 653	348 631
Brutto tonn per km	143 821	402 833	10 984
Antall tog per km	479	115	33
sporveksler per km	1,16	0,70	0,47
Meter med plattform per km	66	22	24
Meter med tunell per km	115	174	63
Meter med bru per km	52	6	14
Kurvatur <300 meter	0,4	0,7	0,5
Kurvatur <500 meter	1,1	4,3	1,8
Gjennomsnittlig hastighet	88	63	77
Tillatt aksellast	21	31	21

I tidligere studier har nettet vært delt inn i flere regioner. Utfra en vurdering av de tekniske variablene mv. finner vi imidlertid at det ikke er grunnlag for å dele nettet opp ytterligere. I tillegg er det vesentlig at modellen viser at det er signifikante forskjeller i kostnader mellom regionene for at det skal rettferdiggjøres å differensiere prisene, jf. artikkel 5 (1) i forordningen. Dette er f.eks. ikke tilfelle i en tidligere analyse av Jernbaneløst¹².

Heterogenitet i konstanten eller stigningskoeffisienten

Det er to måter å sjekke om ulike baneområder har ulik elastisitet, enten ved å inkludere dummyvariabler for baneområdene eller ved å inkludere baneområdene som interaksjonsvariabler. Å inkludere dummyvariabler tilsvarer å skifte konstanten i regresjonslikningen, dvs. at regresjonslinja får ulikt nivå for de ulike baneområdene. Å inkludere baneområdene som interaksjonsvariabler vil si at variablene som representerer baneområder multipliseres med trafikkvariabelen. Da er det koeffisienten for trafikk som blir forskjellig for hvert baneområde. Vi ønsket å analysere om det er forskjell mellom baneområdene når det gjelder i hvilken grad en endring i trafikk gir utslag i endring i kostnader. Interaksjonsvariabler er en mer treffsikker metode til dette formålet.

4.3.5 Mål på trafikken

I artikkel 5 (1) i forordningen står det at «Infrastrukturforvalteren skal beregne gjennomsnittlige enhetskostnader for hele jernbanenettet ved å dividere de direkte kostnadene for hele nettet med det samlede antallet forventede eller faktisk gjennomførte kjøretøykilometer, togkilometer eller bruttotonnkilometer». Bane NOR har testet forskjellige mål på trafikken. Det ble kjørt ulike modeller med togkilometer og brutto tonnkilometer som mål på trafikkbelastningen i regresjonsmodellen, men dette ga ikke signifikant forskjell i modellens forklaringsmakt. Noe av grunnen til dette er at vi skiller

¹² Kjørevegsavgift for norsk jernbane - Metodikk og resultater 2014

Metodikk og beregninger av direkte kostnader

ut Ofotbanen og Osloområdet som egne områder¹³. Togkilometer ble valgt som mål på trafikken. Dette er vurdert som den samfunnsøkonomisk beste løsningen i og med at vi ikke ønsker unødvendig reduksjon i togtilbudet. Togkilometer er også brukt som prisenhet i mange andre land i Europa¹⁴. Det ble vurdert om en skulle ha ulike priser for ulike vektclasser, men siden prisene differensieres mellom regioner, var ikke dette mulig i datasettet da korrelasjonen mellom region og vektklasse er svært høy.

4.3.6 Valgt modell

Da valget av funksjonsform falt på en dobbel-log-variant og togkilometer ble valgt som estimat på trafikkbelastning, ble modellen for estimering av elastisiteter følgende:

$$\ln \text{Fastkost} = \beta_0 + \beta_1 \ln \text{Km} + \beta_2 \ln \text{Antalltog} + \beta_3 \text{Osloområdet} * \ln \text{Antalltog} + \beta_4 \text{Ofotbanen} * \ln \text{Antalltog} + \epsilon$$

Osloområdet og *Ofotbanen* kan ha verdien 0 eller 1. For andre banestrekninger er begge lik 0, og koeffisienten for $\ln \text{Antalltog}$ er β_2 . For banestrekninger i Osloområdet blir koeffisienten til $\ln \text{Antalltog}$ lik $\beta_2 + \beta_3$, mens for Ofotbanen blir koeffisienten $\beta_2 + \beta_4$.

I Tabell 6 presenteres deskriptiv statistikk over variablene som ble vurdert i modellen (se Tabell 1 for måleenheter).

Tabell 6 Deskriptiv statistikk¹⁵

Variabel	Antall observasjoner	Gjennomsnitt	Standardavvik	Min	Max
Fastkost	130	78 700 000	80 500 000	762 823	293 000 000
Km	130	189	228	2	801
Antall tog	130	14 534	21 834	-	126 856
Brutto tonnkm	130	5 345 866	6 824 016	-	34 100 000
Sporveksel	130	103	119	-	470
Platt	130	5 300	6 367	-	27 434
Tunnel	130	13 139	22 478	-	78 803
Bru	130	3 330	3 761	71	12 671
Kurvatur	130	94	101	1	398
Gjennomsnittlig tillatt snitthastighet	130	79	21	25	136
Gjennomsnittlig aksellast	130	14	2	11	18

¹³ Korrelasjonen mellom antall tog og brutto tonn går fra å være 80 % uten differensiering på baneområder til å bli 85-98 % for hvert delområde

¹⁴ IRG-rail 2020, Review of charging practices for the minimum access package in Europe

¹⁵ Elastisiteten for antall togkm vil være lik den for antall tog, da banelengde er konstant fra år til år

4.3.7 Resultater av regresjonsmodellen

I tabell 6 presenteres estimeringsresultatene basert på vanlig minste kvadraters metode med den valgte dobbel-log funksjonsformen. Se Vedlegg C – Regresjonsresultater ulike modeller for resultater med andre modellvalg og Vedlegg E – tester av modellen for diverse tester av resultatene.

Tabell 7 Regresjonsresultater med valgt modell

In_fastkost	Koeffisient	Standardavvik	T-verdi	P> t	Konf.intervall Min	Konf.intervall Maks
Log(antall tog)	0,1569292	0,0603735	2,6	0,01	0,0374138	0,2764446
Log(km)	0,9196963	0,0403052	22,82	0	0,8399081	0,9994845
Interaksjon Ofofbanen	0,1212635	0,0311231	3,9	0	0,0596523	0,1828747
Interaksjon Osloområdet	0,0484541	0,0180611	2,68	0,008	0,0127004	0,0842077
Konstant	11,78138	0,4776142	24,67	0	10,83589	12,72686

Marginalkostnadene utledes utfra koeffisienten for antall avganger og regionsvariablene. Elastisiteten for antall tog på 0,157 gjelder for referansegruppen, som er regionen «andre strekninger». Tolkningen av en elastisitet på 0,157 for antall tog er at en 10 % økning i antall tog/togkilometer gir 15,7 % i økte kostnader. For togene som kjører i region 2, Ofofbanen, vil elastisiteten for togkm være 0,278¹⁶. Tilsvarende vil elastisiteten for togkm være 0,205 i region 3, Osloområdet. Kombinert med trafikkdata blir den vektete elastisiteten 0,173. Resultatet stemmer godt overens med tidligere studier¹⁷. Utfra justert R² beskriver modellen 84,1 % av variasjonen i kostnadene. Elastisitetene kombinert med gjennomsnittskostnaden gir følgende gjennomsnittlige marginalkostnader for hver region (se Vedlegg B – vurdering av funksjonsformer for sammenheng mellom elastisitet og marginalkostnad):

Tabell 8 Vedlikeholdskostnader per togkm for ulike regioner, i kroner

	Elastisitet	Togkm	Kostnader	Gjennomsnittskostnad	Marginalkostnad, kroner per togkm
Osloområdet	0,21	14 319 646	326 476 096	22,8	4,7
Ofofbanen	0,28	353 556	59 607 699	168,6	46,9
Resten	0,16	32 130 681	1 639 772 660	51,0	8,0

4.4 Resultater uten differensiering utfra aksellast

Prisen vil bli bestemt utfra følgende ligning:

$$P = p * togkm$$

¹⁶ Elastisitet referansegruppe pluss elastisitet for gruppen.

¹⁷ Se f.eks. CATRIN 2008

Hvor P er pris per avgang, p er pris per togkilometer og togkm er faktisk kjørte togkilometer.

Med p gitt ved følgende tabell:

Tabell 9 . Kroner per togkilometer for hver region (2024-kroner)

Region	Marginalkostnad
Osloområdet	5,5
Oftobanen	54,84
Andre strekninger	9,35

5 Differensiering av prisen basert på aksellast

I prismodellen for 2025 vil prisen differensieres utfra aksellast, jf. forordningens artikkel 5 nr. 2 bokstav f). Det er et forbehold om at Statens jernbanetilsyn godkjenner en slik differensiering.



Figur 5 Sammenhengen mellom aksellast og vedlikeholdskostnader

5.1 Sammenheng mellom aksellast og slitasje i Norge

En differensiering basert på aksellast bygger på en forutsetning om at sammenhengen illustrert i Figur 5 er sann. Flere studier har dokumentert denne sammenhengen, og Bane NOR har søkt å påvise på flere måter at den også gjelder på det norske jernbanenettet. Som resultatene i del 4.4 viser er det betydelig høyere direkte kostnader på Oftobanen sammenlignet med andre banestrekninger. Vår gjennomgang av relevante kilder viser at det er de tunge malmtogene med høy aksellast som medfører de høye kostnadene på banestrekningen. En slik differensiering vil innebære at avgiften blir mer riktig satt i forhold til hovedregelen i jernbaneforskriften § 6-2 (1) ved at avgiften i større grad reflekterer kostnaden som oppstår som en direkte følge av den enkelte togtjenesten. Oftobanen er den eneste banestrekningen der det er tillatt med en aksellast på 31 tonn. I det følgende vil vi komme med dokumentasjon på at det er togene med høy aksellast som medfører de høye vedlikeholdskostnadene på Oftobanen.

5.2 Dokumentasjon

Med tilgjengelige data er det ikke mulig å lage noe eksakt estimat for hvordan aksellast påvirker slitasje og de direkte kostnadene. Det er imidlertid mange ting som underbygger at det er en slik sammenheng. Dette vil vi utdype under.

5.2.1 Ekspertvurderinger

En rekke fagpersoner¹⁸ i Bane NOR har bekreftet at det er de tunge malmtogene som forårsaker de høye vedlikeholdskostnadene på Ofotbanen, og at de lette togene på Ofotbanen ikke sliter noe mer på infrastrukturen enn lette tog som kjører på tilsvarende kurvatur på jernbanenettet ellers.

Erfaringer har vist at tunge godstog på baner med høy stigning og trange kurver er en uheldig kombinasjon som fører til store belastninger i kontaktflate hjul/skinne, sterk slitasje og høye vedlikeholdskostnader. (Schelle, 2014, s.31) Sammenhengen mellom aksellast og skinneslitasje kan imidlertid også belyses ut ifra en teoretisk tilnærming. I følge Knothe og Stichel, 2003, s.273 er det vanlig å gå ut ifra at mengden materiale som slites bort er proporsjonal med friksjonsarbeidet som gjøres på det aktuelle stedet. Friksjonsarbeidet skyldes longitudinell krypkraft, lateral krypkraft samt et krypmoment som virker i kontaktflate mellom hjul og skinne. Det foregår en kontinuerlig glidning i flaten mellom hjul og skinne, og friksjonsarbeidet er summen av hver av disse tre virkende krypkreftene multiplisert med sin respektive glideavstand.

De virkende krypkreftene er igjen proporsjonal med normalkraften i kontaktpunktet, som er en komponent av aksellasten. Jo høyere den opptredende aksellasten er, desto større er altså mengden materiale som blir slitt bort fra skinnen og desto større geometrisk endring må forventes på skinnetverrsnittet. I tillegg til den gradvise nedslipingen av skinnene ser vi også problemer med kontaktutmatting på Ofotbanen, som er et ytterligere fenomen som bidrar til å redusere skinnenes levetid. I likhet med nedslipingen, så skyldes også kontaktutmatting krypkrefter mellom hjul og skinne. De svært høye kontaktspenningene som oppstår mellom hjul/skinne overskrider stålets flytespenning og gir opphav til plastisk deformasjon og initiering av mikrosprekker i overflaten på skinnhodet. Den gjentakende belastningen over flytespenningen over flere sykluser resulterer i sprekkvekst i form av ulike kontaktutmattingsskader.

5.2.2 Lærebøker i jernbaneteknikk

I lærebøker i jernbaneteknikk er det beskrevet hvilke faktorer som påvirker slitasjen av infrastrukturen. Der står det blant annet at aksellastnivået har innvirkning på nedbrytningen av ballast, skinner og sporveksler. Det står også at aksellaster på Ofotbanen på 30 tonn kombinert med sterkt fall og krapp kurvatur, gjør at slitasjen på banestrekningen er ekstrem.

5.2.3 Samfunnsøkonomisk analyse

I 1997 ble det gjennomført et omfattende prosjekt for å vurdere konsekvensene av å øke aksellasten på Ofotbanen/Malmbanen fra 25 til 30 tonn. Prosjektet var et samarbeid mellom Jernbaneverket, Banverket¹⁹, MTAB/MTAS og LKAB. En av tingene som ble estimert var samfunnsøkonomisk lønnsomhet, og herunder økning i vedlikeholdskostnader for infrastrukturforvalter.

I analysen er det presentert to alternativer, Basis 30 tonn og Eksp 30 tonn. I begge alternativene er det forutsatt en økning i antall vogner og aksellast, mens i alternativ Eksp 30 tonn er det også en forutsetning om økt transportert volum. Når man sammenligner trafikkmengden i dag med alternativene i analysen, ligger den nærmest alternativ Eksp 30 tonn.

Resultatet av analysen fremgår i Tabell 10 og viser en årlig økning i vedlikeholdskostnader på den norske delen av banestrekningen på 1,2-8,6 millioner 1998-kroner, avhengig av hvilket alternativ man

¹⁸ Blant annet har sjefsrådgiver for vedlikehold og asset management, banesjef på Ofotbanen, sjefsingeniør sporteknikk, leder strategisk vedlikehold, samfunnsøkonomer og sporingeniører vært involvert i arbeidet.

¹⁹ Banverket har siden 2010 vært en del av Trafikverket

ser på. Gitt trafikkvolumet de senere årene, er det som nevnt over mest relevant å ta utgangspunkt i resultatet for alternativ Eksp 30 tonn.

Tabell 10 Endring i årlige vedlikeholdskostnader

	Basis 30 tonn	Eksp 30 tonn
Gällivare-Kiruna	+0,24	+3,1
Råtsi-Svappavaara	+0,75	+0,75
Kiruna-Grensen	+3,8	+14,3
Grensen-Narvik	+1,2	+8,6
Summa	+6,0	+26.7

Ved å kombinere dette resultatet med prisveksten i årene²⁰ siden da, får vi følgende resultater:

Tabell 11 Merkostnad knyttet til høy aksellast

Årlig økning i vedlikeholdskostnader, 1998-kroner	8 600 000
Kostnadsøkning drift og vedlikehold av veier, 2000K1-2023K1	2,4
Merkostnad knyttet til aksellast på Ofotbanen, 2023-kroner	21 108 211

Den samfunnsøkonomiske analysen er gjort langt tilbake i tid, så resultatene er ikke nødvendigvis direkte overførbare til i dag, og disse brukes heller ikke direkte i prismodellen. Samtidig ble det gjort et grundig arbeid, og det har ikke skjedd veldig store endringer innen vedlikehold av jernbane. Resultatene viser uansett at det er en betydelig økning i årlige vedlikeholdskostnader når man øker aksellasten på en bane. Dette underbygger at det er de tunge malmtogene med aksellast over 25 tonn som forårsaker de høye direkte kostnadene på Ofotbanen.

5.2.4 Målevogndata

Våren 2023 ble det undersøkt om det var mulig å bruke målevogndata for å sammenligne slitasjen på Ofotbanen med slitasjen andre steder på sammenlignbare strekninger. Målet var å isolere effekten av aksellast på slitasje, i og med at det kun er på Ofotbanen det kjøres med en aksellast på 31 tonn. Det viste seg imidlertid at feilmarginen til målingene fra målevognen er såpass stor at det ikke er mulig å bruke disse dataene per i dag. Det vil snart tas i bruk en ny målevogn med mindre feilmargin, så forhåpentligvis er dette en metode man kan bruke på litt lengre sikt. Uansett bekrefter springeniørene som jobber med målevogndata at det er de tunge togene med høy aksellast som forårsaker de høye kostnadene på Ofotbanen.

5.2.5 Oppdatert regresjonsanalyse

For å beregne direkte kostnader til Network Statement 2024 ble det, som tidligere beskrevet, benyttet en regresjonsanalyse. I analysen var det en geografisk differensiering av områdene Osloområdet, Ofotbanen og resten av landet. Dersom man i stedet hadde differensiert mellom Osloområdet og resten av landet samt aksellast over og under 25, viser resultatet at prisen for de med lav aksellast ville

²⁰ Statistisk sentralbyrå. Statistikkbank tabell 08663: Kostnadsindeks for drift og vedlikehold av veier

Metodikk og beregninger av direkte kostnader

vært den samme som prisen man fant for resten av landet i regresjonen med tre regioner og ingen differensiering på aksellast.

5.2.6 Andre land

I en oversikt fra IRG-Rail fra 2022 kommer det frem at det var 6 land som differensierte grunnprisen utfra aksellast på det tidspunktet, og at flere land har diskutert det. Blant annet har det blitt påvist en sammenheng mellom aksellast og slitasje i Polen, Sverige og Nederland.

5.3 Terskelverdi høy og lav aksellast

Det vil være en sats for togtrafikken med aksellast på 25 tonn og over, og en lavere sats for togtrafikken under 25 tonns aksellast. Skillet er satt ved 25 tonn av flere grunner. Blant annet er det en ikke-lineær sammenheng mellom aksellast og slitasje (Odolinski 2016), så den største effekten av aksellast finner man blant togene med veldig høy aksellast. I tillegg viser regresjonsanalysen beskrevet i del 5.2.5 at det er en signifikant forskjell i kostnadsnivået mellom baner trafikkert av tog med over og under 25 tonns aksellast. De høye direkte kostnadene på Ofofbanen underbygger også på at det er togene med svært høy aksellast som i størst grad påvirker slitasjen.

5.4 Beregninger

Totale direkte kostnader på Ofofbanen ble beregnet ved bruk av regresjonsanalysen beskrevet i del 4. Når grunnprisen skal differensieres skal dette ikke øke de totale direkte kostnadene på nettet (forordningens artikkel 5 nr. 3). Nivået på de totale direkte kostnadene på Ofofbanen og nettet totalt vil derfor beholdes, men det vil bli en annen fordeling mellom trafikk med høy og lav aksellast. Fordelingen vil dermed bli mer riktig i forhold til hovedregelen i jernbaneforskriften § 6-2 (1). Trafikken som har høy aksellast i kun én retning, skal betale satsen for trafikk med lav aksellast når de i den andre retningen kjører med aksellast på under 25 tonn/aksel.

Først er det laget et estimat for direkte kostnader for trafikken med lav aksellast på Ofofbanen.

$$DKL_O = P_R * TKM_{OL}$$

DKL_O = Direkte kostnader lav aksellast på Ofofbanen

P_R = Pris per togkm for region «resten av landet»

TKM_{OL} = Togkm trafikk med lav aksellast på Ofofbanen

Deretter er resten av de beregnede direkte kostnadene på Ofofbanen fordelt på trafikken med høy aksellast.

$$DKH = DK_O - DKL_O$$

DKH = Direkte kostnader høy aksellast

DK_O = Direkte kostnader Ofofbanen totalt

DKL_O = Direkte kostnader lav aksellast på Ofofbanen

Kostnad per togkilometer for trafikk med høy aksellast blir som følger.

$$P_H = DKH / TKM_H$$

P_H = Pris per togkm trafikk med høy aksellast

DKH = Direkte kostnader høy aksellast

TKM_H = Togkm trafikk med høy aksellast

5.5 Resultater

Resultatet av differensieringen blir følgende grunnpris per togkilometer:

Tabell 12 Grunnpris 2025, i 2024-priser

Aksellast, tonn per aksel	Banestrekning	Grunnpris Kr pr. togkm
Under 25	Osloområdet	5,50
	Oftobanen	9,36
	Øvrige strekninger	9,36
Over 25	Osloområdet	149,69
	Oftobanen	
	Øvrige strekninger	

6 Implementering og anbefalinger

Denne rapporten vil inngå i høringen av Network Statement 2025 og det tas sikte på at ny prismodell og resultatene i denne rapporten vil bli gjeldende fra og med ruteplanperiode 2025.

Bane NOR legger ikke opp til at det blir noen implementeringsperiode.

Bane NOR legger i utgangspunktet opp til at prisene justeres periodisk. Ved vesentlig bedre grunnlagsdata eller andre større endringer vil prisene imidlertid kunne endres på bakgrunn av dette.

Periode mm	Beskrivelse
Femårig justering	<p>Bane NOR vil oppdatere kostnadskalkylene om lag hvert femte år basert på tilsvarende eller forbedrede metoder, og der mer oppdaterte data kan brukes som grunnlag i estimeringen. Mellom de større justeringene endres prisene årlig i henhold til en egnet SSB-indeks. Det benyttes kostnadsindeksen for drift og vedlikehold av vegger.</p> <p>Selve prisjusteringen foretas etter følgende prinsipp (1):</p> $(1) \quad P_{t+1} = P_t \cdot \left(\frac{KI_t^{Q2}}{KI_{t-1}^{Q2}} \right)$
Årlig justering	<p>der: P_{t+1} = pris neste år P_t = pris inneværende år KI^{Q2} = SSBs indeks pr. annet kvartal for inneværende (t) og foregående (t-1) år</p> <p>Dette innebærer en prisjustering etterskuddsvis, men den gir stor forutsigbarhet for togselskapene, da neste års priser vil være klare tredje kvartal året før. Samtidig kan man følge med på indeksen underveis i året.</p>
Nye, ombygde eller nedlagte objekter	<p>Dersom det i forbindelse med nye anlegg, ferdigstilles nye objekter eller større ombygninger av objekter, samt nedleggelse av gamle i fireårsperioden, skal dette tas inn i kostnadsgrunnlaget når anlegget/objektet tas i bruk eller tas ut av bruk.</p>

7 Bibliografi

Infrastrukturavgifter - Implementeringsplan, Gunnar Markussen 2017

IRG-Rail, Review of charging practices for the minimum access package in Europe, November 2020

CATRIN Cost Allocation of TRansport INfrastructure cost, Mars 2008

Track Access Charges in Freight Transport, Justina Hudenko, Cambridge Scholars Publishing 2019

<https://stats.idre.ucla.edu/other/mult-pkg/faq/general/faqhow-do-i-interpret-a-regression-model-when-some-variables-are-log-transformed/>

Kjørevegsavgift for norsk jernbane - Metodikk og resultater, Jernbaneverket, 2014

Marginalkostnader i jernbanenettet, Frichsenteret, Øystein Børnes Daljord, 2003

COMMISSION IMPLEMENTING REGULATION (EU) 2015/909 of 12 June 2015

Independent Regulators' Group – Rail IRG–Rail Charges Working Group, An introduction to

the calculation of direct costs in respect of implementing regulation 2015/909 9 November 2016

<http://www.econometrics.com/intro/trend.htm>

Metodikk og beregninger av direkte kostnader

Taboga, Marco (2021). "Heteroskedasticity-robust standard errors", Lectures on probability theory and mathematical statistics. Kindle Direct Publishing. Online appendix.

Jernbanedirektoratet, Veileder i samfunnsøkonomiske analyser i jernbanesektoren, 2018

Schelle, H., (2014). Radverschleißreduzierung für eine Güterzuglokomotive durch optimierte Spurführung. Ph.d.-avhandling. Technische Universität Berlin.

Knothe, K. og Stichel, S., (2003). Schienenfahrzeugdynamik. Berlin-Heidelberg, Tyskland: Springer-Verlag

30 tonn på Ofotbanen/Malmbanen, Jernbaneverket, Banverket, LKAB, juli 1997

30 tonn på Ofotbanen/Malmbanen Samfunnsøkonomisk analyse strekningen Kiruna – Narvik (Nordre omløp), Jernbaneverket, Banverket, LKAB, juli 1997

Overview of the Implementation of Direct Costs in Europe, Independent Regulators' Group – Rail

Working Group Charges, November 2022

Dynamic Axle Loads as a Main Source of Railway Track Degradation M.J.M.M. STEENBERGEN a , E. DE JONG b and A. ZOETEMAN, 2015

Annex 13 NETWORK STATEMENT 2019/2020, PKP Polskie linie kolejowe s.a.

The impact of axle loads on rail infrastructure maintenance costs, Kristofer Odolinski – VTI, CTS Working Paper 2016:21

8 Vedlegg A – Begreper og uttrykk

DRAGE = Data, Rapport og Analyse Generator og er Bane NORs datavarehus for oppfølging av punktlighet, økonomi og fakturering av infrastrukturavgifter (System for beregning av påslag ut fra data mottatt fra TIOS og ulike regler (beløpssatser mv.))

TRASÉ = TRAfikkrelatert StrEkningsinformasjon. TRASÉ skal gi tilgang til informasjon om infrastrukturen som er relevant for trafikkformål.

BaneData = Bane NORs infrastrukturdatabase

TIOS = Bane NORs Trafikkinformasjons- og oppfølgingssystem

Den minste pakken med tjenester = tjenester som nevnt i jernbaneforskriften § 4-1

Direkte kostnader = trafikkavhengige kostnader, dvs. kostnaden som oppstår som en direkte følge av den enkelte tog-tjenesten

Direkte enhetskostnad = direkte kostnad per togkilometer, kjøretøykilometer, et togs bruttotonnkilometer eller en kombinasjon av disse

Grunnpris = pris for den minste pakken med tjenester, tilsvarer de direkte kostnadene

Ikke-kvalifiserte kostnader = kostnadselementer som ifølge artikkel 4 i forordning 2015/909 ikke skal inngå i de direkte kostnadene

Aktivitetsbasert kostnadskalkulasjon (ABC-metode) = en metode for å henføre en bedrifts kostnader. Først henføres de til aktivitetene, og deretter videre til produktene basert på hvor mye produktene fungerer som en kostnadsdriver for de ulike aktivitetene.

Forordningsmetode = en form for ABC-metode som beskrives i forordning 2015/909

Økonometrisk metode = anvendelse av statistiske metoder, særlig for analyse av økonomiske data for å få innsikt i økonomiske forhold

Teknisk kostnadsmodellering = en form for ingeniørm metode, der man bruker ekspertvurderinger til å estimere kostnadssammenhenger

IRG-Rail = "Independent Regulators' Group – Rail", nettverk for reguleringsorganer fra 31 land i Europa

Aksellast = Antall tonn per aksel

9 Vedlegg B – vurdering av funksjonsformer

Translog

Det er fordelere ved å velge en funksjonsform som har minimalt med restriksjoner pålagt på den underliggende teknologien, f.eks. translog. En slik funksjonsform krever imidlertid at flere parametere skal estimeres, noe som gjør at det blir færre frihetsgrader igjen²¹.

²¹ Catrin 2008

Dobbel-log

En dobbel-log-funksjonsform er et alternativ til translog. Ulempen er at den er mer restriktiv siden det er en antagelse om konstant elasticitet, men fordelene er bl.a. at resultatene av modellen er enkle å tolke.

Kvadratisk modell

En kvadratisk modell kan inkludere forklaringsvariablene enkeltvis og multiplisert med seg selv, for eksempel formen $Z = b_0 + b_1X + b_2Y + b_3X^2 + b_4Y^2 + \varepsilon$. Denne funksjonsformen tar høyde for ikke-lineære sammenhenger.

Resultater

Funksjonsformene dobbel-log, translog og kvadratisk modell ble testet, herunder ulike varianter av hver av dem med hensyn til hva slags trafikkmål og andre variabler som skulle inngå i modellen. I tabell 6 i Vedlegg C – Regresjonsresultater ulike modeller vises resultater fra et utvalg av testene.

I valget mellom dobbel-log, translog og kvadratisk modell ble flere kriterier vurdert. Justert R^2 er et mål på hvor mye av variasjonen i kostnader som kan forklares av variablene i modellen. Justert R^2 er ikke direkte sammenlignbar på tvers av de ulike funksjonsformene. Alle har et akseptabelt nivå, og det er for små forskjeller til at R^2 kan vektlegges i noen særlig grad i valget av modell. Videre så vi på om modellen ga signifikante koeffisienter. Her viste testene for translog seg lite egnet, da viktige variabler som kilometer og trafikkmål (antall tog eller bruttotonn) ikke blir signifikante. Translog så følgelig ikke ut til å være en god modell for å beskrive sammenhengene mellom togtrafikken og kostnadene i vårt datasett²², og ble derfor ikke valgt som funksjonsform. Kvadratisk modell ga signifikante koeffisienter for de nevnte variablene, men det er problematisk å gi resultatet for marginalkostnader en meningsfylt tolkning i de variantene vi har testet. I tillegg ble enkelte koeffisienter ikke-signifikante.

Dobbel-log modellen

Utfra vurderingene over falt valget på en dobbel-log-modell. I en slik modell er det elasticiteten man estimerer.

Rent matematisk vil det være en sammenheng mellom marginalkostnaden og gjennomsnittskostnaden via kostnadselasticiteten. Sammenhengen er:

$$B' = e(x) * \bar{B}(X)$$

- B' = marginalkostnaden
- \bar{B} = gjennomsnittskostnaden
- e = kostnadselasticiteten
- x = produksjonsvolum

Kostnadselasticiteten angir i hvilken grad totalkostnadene øker med økende produksjonsvolum. En prosent økning i produksjonsvolum gir $e(x)$ prosent økning i totalkostnadene. Dersom elasticiteten er mindre enn én ($e(x) < 1$), vil vi ha fallende gjennomsnittskostnader med hensyn til produksjonsvolum, eller stordriftsfordeler. Prising basert på marginalkostnadsprinsippet vil i dette tilfelle ikke gi full kostnadsdekning. Dersom elasticiteten er større enn én ($e(x) > 1$), vil marginalkostnaden være større enn gjennomsnittskostnaden, og prising basert på marginalkostnadsprinsippet vil gi kostnadsdekning.

²² Det samme var f.eks. tilfellet for Daljord 2003

Metodikk og beregninger av direkte kostnader

Jernbanen er kjennetegnet ved fallende gjennomsnittskostnader²³, så priser basert på marginalkostnader vil ikke gi kostnadsdekning.

10 Vedlegg C – Regresjonsresultater ulike modeller

Tabell 13 Regresjonsresultater fra utvalgte modeller. Koeffisienter og tilhørende p-verdi (signifikanskriterium p<0,05)

	1) Dobbellog med brutto tonn og interaksjon region	2) Dobbellog med antall tog og interaksjon region	3) Dobbellog med antall tog interaksjon region og trend	4) Dobbellog med antall tog og andel tekniske variabler	5) Translog med antall tog	6) Translog med bruttotonn og regioner	7) Kvadratisk, mill. kr., med mill. togkm og regioner
Justert R2	0,853	0,841	0,847	0,826	0,829	0,876	0,783
ln_km	0,919	0,920	0,919	0,935	0,493	1,774	
<i>p-verdi</i>	(0)	(0)	(0)	(0)	(0,277)	(0,002)	
ln_anttog		0,157	0,168	0,240	-0,147		
<i>p-verdi</i>		(0,01)	(0,006)	(0,011)	(0,771)		
ln_brt	0,175					-0,674	
<i>p-verdi</i>	(0)					(0,273)	
halv_inkm2					0,142	0,123	
<i>p-verdi</i>					(0,002)	(0,002)	
halv_intog2					0,057		
<i>p-verdi</i>					(0,296)		
inkm_intog					-0,023		
<i>p-verdi</i>					(0,64)		
halv_inbrt2						0,090	
<i>p-verdi</i>						(0,039)	
inkm_inbrt						-0,093	
<i>p-verdi</i>						(0,006)	
mill_togkm							71,041
<i>p-verdi</i>							(0)
mill_togkm2							-6,595
<i>p-verdi</i>							(0)
Plattandel				-0,001			
<i>p-verdi</i>				(0,761)			
Tunnandel				-0,001			
<i>p-verdi</i>				(0,45)			
Bruandel				0,006			
<i>p-verdi</i>				(0,056)			
ln_kurv1				-0,051			
<i>p-verdi</i>				(0,365)			
doslo_intog		0,048	0,046				
<i>p-verdi</i>		(0,008)	(0,01)				
dofot_intog		0,121	0,121				
<i>p-verdi</i>		(0)	(0)				
doslo_inbrt	0,030						
<i>p-verdi</i>	(0,006)						
dofot_inbrt	0,038						
<i>p-verdi</i>	(0,033)						
Osloområdet						0,226	-61,235
<i>p-verdi</i>						(0,273)	(0)

²³ Jernbanedirektoratet 2018

Metodikk og beregninger av direkte kostnader

	1) Dobbellog med brutto tonn og interaksjon region	2) Dobbellog med antall tog og interaksjon region	3) Dobbellog med antall tog interaksjon region og trend	4) Dobbellog med antall tog og andel tekniske variabler	5) Translog med antall tog	6) Translog med bruttotonn og regioner	7) Kvadratisk, mill. kr., med mill. togkm og regioner
Oftotbanen						0,323	23,187
<i>p-verdi</i>						(0,338)	(0,183)
aar2			0,120	0,123			
<i>p-verdi</i>			(0,469)	(0,488)			
aar3			0,298	0,299			
<i>p-verdi</i>			(0,069)	(0,087)			
aar4			0,396	0,403			
<i>p-verdi</i>			(0,016)	(0,022)			
aar5			0,359	0,363			
<i>p-verdi</i>			(0,029)	(0,038)			
Konstant	10,63	11,78	11,45	10,99	13,57	14,29	12,76
<i>p-verdi</i>	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0,003)	(0,013)

11 Vedlegg D – modell med og uten tidstrend

Sammenligningen av modell med og uten tidstrend ble gjort i STATA med kommandoen nestreg. Som det kommer frem i tabellen under ga det en noe høyere justert R^2 å inkludere dummyvariabler for trend, men det totale signifikansnivået er høyest i modell 1. Enkelte av årene fikk også ikke-signifikante koeffisienter. Siden det i tillegg er liten forskjell i de viktige koeffisientene mellom modellene, ble modellen uten tidstrend valgt.

Tabell 14 Sammenligning av modell med og uten trend

```
Block 1: ln_anttog ln_km dofot_lntog doslo_lntog
```

Source	SS	df	MS	Number of obs	=	127
Model	233.543119	4	58.3857797	F(4, 122)	=	167.93
Residual	42.4164059	122	.347675458	Prob > F	=	0.0000
Total	275.959525	126	2.19015496	R-squared	=	0.8463
				Adj R-squared	=	0.8413
				Root MSE	=	.58964

ln_fastkost	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]
ln_anttog	.1569292	.0603735	2.60	0.010	.0374138 .2764446
ln_km	.9196963	.0403052	22.82	0.000	.8399081 .9994845
dofot_lntog	.1212635	.0311231	3.90	0.000	.0596523 .1828747
doslo_lntog	.0484541	.0180611	2.68	0.008	.0127004 .0842077
_cons	11.78138	.4776142	24.67	0.000	10.83589 12.72686

Block 2: aar2 aar3 aar4 aar5

Source	SS	df	MS	Number of obs	=	127
Model	236.397465	8	29.5496831	F(8, 118)	=	88.14
Residual	39.5620601	118	.335271696	Prob > F	=	0.0000
				R-squared	=	0.8566
				Adj R-squared	=	0.8469
Total	275.959525	126	2.19015496	Root MSE	=	.57903

ln_fastkost	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
ln_anttog	.1677831	.0594236	2.82	0.006	.0501081	.285458
ln_km	.9194341	.0395818	23.23	0.000	.8410513	.9978169
dofot_lntog	.1212232	.0305631	3.97	0.000	.0606999	.1817465
doslo_lntog	.0461819	.0177542	2.60	0.010	.0110237	.0813401
aar2	.1203193	.1656421	0.73	0.469	-.2076971	.4483357
aar3	.2978713	.1623372	1.83	0.069	-.0236006	.6193431
aar4	.395842	.1625562	2.44	0.016	.0739365	.7177476
aar5	.3585304	.1624487	2.21	0.029	.0368377	.6802231
cons	11.45284	.4880582	23.47	0.000	10.48636	12.41933

Block	Block		Residual		Pr > F	R2	Change in R2
	F	df	df				
1	167.93	4	122	0.0000	0.8463		
2	2.13	4	118	0.0815	0.8566	0.0103	

12 Vedlegg E – tester av modellen

Bane NOR har gjennomført noen statistiske tester for å vurdere kvaliteten på modellen.

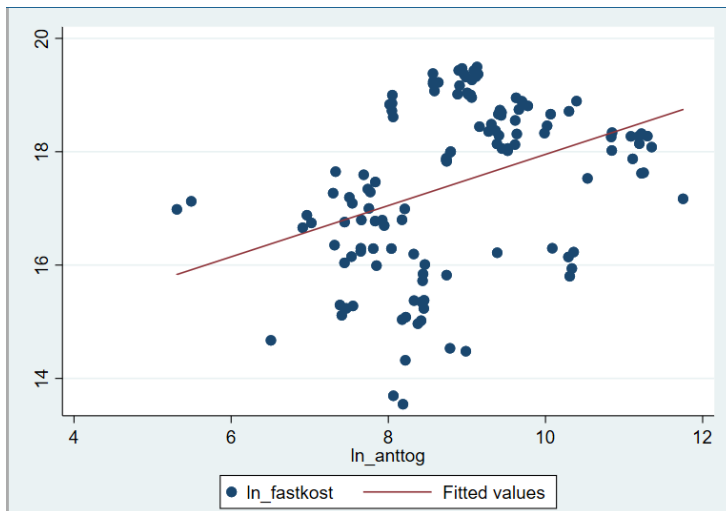
I en F-test ble nullhypotesen om at alle koeffisienter er lik 0 samtidig forkastet, og vi kan dermed konkludere med at korrelasjonen mellom modellen og de avhengige variablene er statistisk signifikant.

Det er også noen forutsetninger som bør være oppfylt for at en skal kunne bruke minste kvadraters metode:

- Lineær sammenheng mellom variablene
- Residualene skal ha konstant varians (homoskedastisitet)
- Residualene skal være normalfordelte
- Residualene skal være uavhengige (ingen autokorrelasjon)

Er sammenhengen mellom variablene lineær?

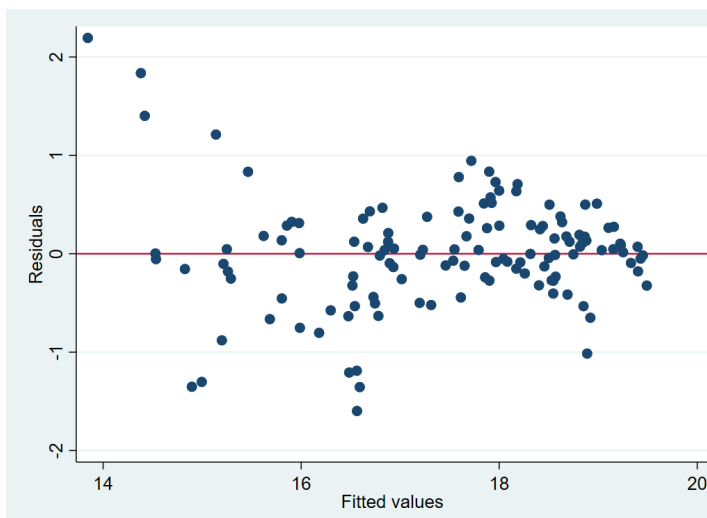
For å kunne bruke minste kvadraters metode må variablene i modellen ha en lineær sammenheng. I analysen er det gjort en antagelse om at det ikke er en lineær sammenheng mellom kostnader og antall tog, men når vi transformerer variablene til logaritmisk form blir likevel modellen lineær i de utledede variablene. For å teste om sammenhengen mellom de utledede variablene $\log(\text{faste kostnader})$ og $\log(\text{antall tog})$ er lineær er det tatt ut et plott fra STATA over disse to variablene. Figur 4. viser at en lineær modell er en god tilnærming.



Figur 6 Plott av log(faste kostnader) og log(antall tog)

Har residualleddene konstant varians?

Det ble undersøkt hvorvidt antagelsen om konstant varians er oppfylt i valgt modell. For at denne antagelsen skal være oppfylt, skal plottet vise en jevn spredning omkring null, og spredningen skal ikke endre seg langs aksene. Dersom spredningen f.eks. bøyer seg ut i vifteform langs aksene (variansen blir større), bryter dette mot forutsetningene om konstant varians. Residualplottet viser at det er antydninger til noe større varians blant de lavere verdiene.



Figur 7 Residualplott med dobbel-log funksjonsform

Når variansen i residualleddene ikke er konstant, betyr det at man har utfordringer med heteroskedastisitet. Dette påvirker ikke estimatene eller justert R^2 , men det påvirker standardfeil, t-verdier og konfidensintervall. For å være sikker på at resultatene er signifikante også dersom det er et problem med heteroskedastiske restledd, ble det kjørt modeller i STATA med robuste standardavvik justert for heteroskedastisitet²⁴. Koeffisientene var fremdeles signifikante. Her er regresjonsresultatene av den valgte modellen med robuste standardfeil for å justere for problemer med heteroskedastisitet.

²⁴ Taboga 2001

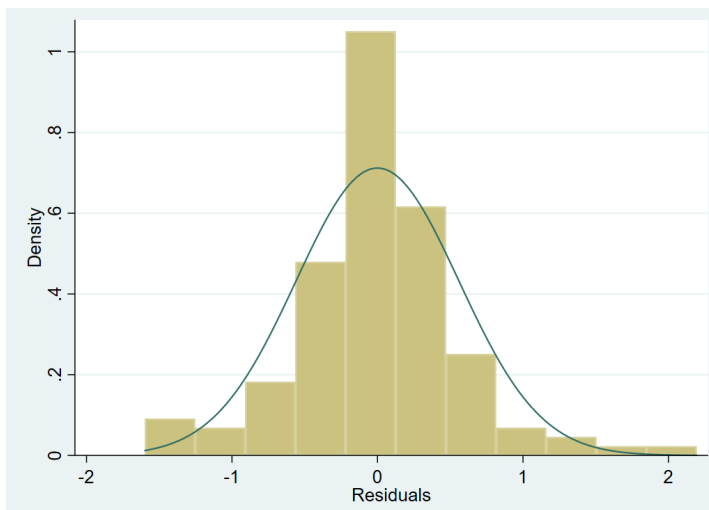
Linear regression	Number of obs	=	127
	F(4, 122)	=	110.40
	Prob > F	=	0.0000
	R-squared	=	0.8463
	Root MSE	=	.58964

ln_fastkost	Coef.	Robust Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
ln_anttog	.1569292	.0587717	2.67	0.009	.0405846	.2732737
ln_km	.9196963	.0483248	19.03	0.000	.8240326	1.01536
dofot_lntog	.1212635	.0094018	12.90	0.000	.1026518	.1398752
doslo_lntog	.0484541	.019195	2.52	0.013	.0104556	.0864525
_cons	11.78138	.5710556	20.63	0.000	10.65092	12.91184

Figur 8 Regresjonsresultater med robuste standardfeil

Er residualleddene normalfordelte?

For å undersøke om residualleddene er normalfordelte, ble det laget et histogram i STATA. Dersom en skal kunne si at residualleddene er normalfordelte skal histogrammet ligne normalfordelingskurven, det vil si ha en symmetrisk topp sentrert i null. Figur 6 viser at det er normalfordeling i restleddene.



Figur 9 Fordeling av restledd

Er det problemer med autokorrelasjon?

En Durbin-Watson test indikerer at det ikke er autokorrelasjon i dataene, Durbin-Watson d-statistic på 2,19.