



Transportøkonomisk institutt  
Stiftelsen Norsk senter for samferdselsforskning



# Revidert modell til beregning av fergekriteriet i inntektssystemet for fylkeskommunene

Kenneth Løvold Rødseth, Bo Dong, Stian Jakobsen, Janis Danebergs

1914/2022

# DENNE SIDEN SKAL SLETTES

## Retningslinjer for hvordan skrive en TØI-rapport

Denne side slettes når link er lest:

[Bruk av TØI-rapportmal](#)

[Disposisjon og innhold av TØI-rapport, samt tabell/figurvettregler](#)

[Kvalitetssikring av TØI-rapport](#)

# DENNE SIDEN SKAL SLETTES

## Skjema/sjekkliste for TØI rapport

Dette skjemaet skal følge hver rapport fram til den foreligger ferdig trykket. Konsulenten som er gitt ansvaret for fremstillingen av rapporten, har ansvaret for at opplegget for fremstillingen blir fulgt.

<b>Prosjektnr.</b>	5213 FERGEKOST
<b>Prosjektleder</b>	Kenneth Løvold Rødseth
<b>Kvalitetsansvarlig</b>	Inger Beate Hovi
<b>Oppdragsgiver</b>	Kommunal- og distriktsdepartementet

<b>Rapportens tittel</b>	Revidert modell til beregning av fergekriteriet i inntektssystemet for fylkeskommunene		
<b>Forfattere</b>	Kenneth Løvold Rødseth, Bo Dong, Stian Jakobsen, Janis Danebergs	<b>Rapport nr.</b>	1914/2022

Standardrapport	<input checked="" type="checkbox"/>
Særskilt utforming	<input type="checkbox"/>
Samarbeid med andre	<input type="checkbox"/>

Utgis kun i elektronisk utgave	<input checked="" type="checkbox"/>
Utgis både i elektronisk- og papirutgave	<input type="checkbox"/>

Antatt sideantall	72
Eksemplarer sendes oppdragsgiver (standard 25)	<input type="checkbox"/>

Rapporten er:

<b>Offentlig</b>	<b>Konfidensiell</b>	<b>Eventuell sperrefrist for offentliggjøring</b>	<b>Frigitt - dato</b>
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1.12.22	06.10.2022

Kvalitetssjekk	Ansvarlig	Sign.
Adm.kons/Adm.medarb..	ANS	Anne-Lene Sandberg, 21.10.22
Forskningsleder/kvalitetsansvarlig	IBH	Inger Beate Hovi, 24.10.2022
Avdelingsleder	KWJ	Kjell Werner Johansen, 24.10.2022
Lest av oppdragsgiver	LTR	Lars-Tore Rydland, 12.10.2022
Administrerende direktør	BJG	Bjørne Grimsrud 24.10.2022

# DENNE SIDEN SKAL SLETTES

## Sjekkliste TØI-rapport

## Annen informasjon

### Forside

### Kryss av

*Forside*

Rapportnummer	<input type="checkbox"/>
Årstall	<input type="checkbox"/>
Tittel evt. undertittel	<input type="checkbox"/>
Forfattere	<input type="checkbox"/>
Oslo dato og årstall	<input type="checkbox"/>

---

### Faktaside + registreres i Rappark

### Kryss av

Tittel	<input type="checkbox"/>
Forfatter(e)	<input type="checkbox"/>
Rapportnummer	<input type="checkbox"/>
Oslo, dato og årstall	<input type="checkbox"/>
Antall sider	<input type="checkbox"/>
ISBN nummer (elektronisk og evt. trykket)	<input type="checkbox"/>
ISSN 2535-5104 (elektronisk og evt. trykket)	<input type="checkbox"/>
Finansieringskilde(r)	<input type="checkbox"/>
Prosjektnr. og navn	<input type="checkbox"/>
Prosjektleder	<input type="checkbox"/>
Emneord (iht. bibl. emneordliste)	<input type="checkbox"/>
Language of report	Language of report

---

### Forord

### Kryss av

Oslo dato og årstall	<input type="checkbox"/>
Administrerende direktør	<input type="checkbox"/>
Avdelingsleder/forskningsleder	<input type="checkbox"/>

---

### Innholdsfortegnelse

### Kryss av

Sammendrag / summary	<input type="checkbox"/>
Kapittelnavn og sidenr.	<input type="checkbox"/>

---

### Sammendrag og Summary

### Kryss av

Rapportnr. og årstall	<input type="checkbox"/>
Forfatter(e)	<input type="checkbox"/>
Oslo årstall antall sider	<input type="checkbox"/>
Bunnteksten med copyright	<input type="checkbox"/>

---

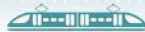
### Annet

### Kryss av

Kildehenvisninger tabeller og figurer	<input type="checkbox"/>
Figurer er ikke koblet	<input type="checkbox"/>
Spor endringer viser ikke kommentarer	<input type="checkbox"/>
Gule lapper sjekket og evt. fjernet	<input type="checkbox"/>
Copyright bunntekst rapportssidene + år	<input type="checkbox"/>
Nummerering av sidene	<input type="checkbox"/>
Overføre rapporten til TOIARKIV	<input type="checkbox"/>
Er evt datafiler overført til datarkiv	<input type="checkbox"/>
Er lagt ut på TØIs internettside	<input type="checkbox"/>
Gule lapper sjekket og evt fjernet	<input type="checkbox"/>

---





<b>Tittel:</b>	Revidert modell til beregning av fergekriteriet i inntektssystemet for fylkeskommunene
<b>Tittel engelsk:</b>	Revised model for estimation of ferry operator costs for Norwegian counties' general grant scheme
<b>Forfatter:</b>	Kenneth Løvold Rødseth, Bo Dong, Stian Jakobsen, Janis Danebergs
<b>Dato:</b>	10.2022
<b>TØI-rapport:</b>	1914/2022
<b>Antall sider:</b>	72
<b>ISSN elektronisk:</b>	2535-5104
<b>ISBN elektronisk:</b>	978-82-480-1970-1
<b>Finansieringskilder:</b>	Kommunal- og distriktsdepartementet
<b>TØIs p.nr.:</b>	5213 FERGEKOST – Prosjekttittel
<b>Prosjektleder:</b>	Kenneth Løvold Rødseth
<b>Kvalitetsansvarlig:</b>	Inger Beate Hovi
<b>Fagfelt:</b>	Samfunnsøkonomiske analyser
<b>Emneord:</b>	Ferger; Inntektssystemet; Optimering; Minste kvadraters metode

## Kort sammendrag

Kommunal- og distriktsdepartementet (KDD) har bedt Transportøkonomisk institutt (TØI) om å utvikle en ny modell til å beregne kriteriet normerte fergekostnader i inntektssystemet til fylkeskommunene. De viktigste utvidingene av eksisterende modell å etablere a) en kostnadsmodell som legger til grunn bruk av nullutslippsteknologi og b) en inntektsmodell som bygger på AutoPASS-regulativet.

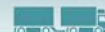
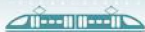
Innen rammen av prosjektet er det utviklet en ny kostnadsmodell bygget på optimering og en ny inntektsmodell bygget på minste kvadraters metode. Den nye kostnadsmodellen viser en reduksjon i energikostnader og en økning i kapitalkostnader sammenliknet med modellen KDD bruker i dag. Den nye inntektsmodellen gir et høyere anslag på billettinntekter enn den gamle modellen. Inntektsbehovet per fylke beregnes ganske likt av nytt og eksisterende modellapparat. Vi anbefaler fortsatt bruk av KDDs enkle kostnadsmodell på kort sikt, men implementering av den nye inntektsmodellen utviklet i prosjektet.

## Summary

The Ministry of Local Government and Regional Development (KDD) has asked the Institute of Transport Economics Institute (TØI) to develop a new model to calculate ferry operator costs for the counties' general grant scheme. The most important extensions of the existing model is to establish a) a cost model for zero-emission ferry operations and b) a revenue model based on the AutoPASS billing scheme.

A new cost model using optimization and a new income model using Ordinary Least Squares have been developed within this project. The new cost model shows a reduction in energy costs and an increase in capital costs compared to the model KDD uses today. The new revenue model estimates higher ticket revenue than the old model. Regardless, the income requirement per county is quite similar when comparing the results from the new and existing model apparatus. We therefore recommend continued use of KDD's simple cost model in the short run, but implementation of the new simple income model developed in this project.

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

Det har vært store endringer i fergesektoren de seneste årene, både knyttet til innfasing av nullutslippsteknologi og endring i billettering grunnet innfasingen av AutoPASS-regulativet. Dette kan ha betydning for fylkenes relative inntektsbehov for å tilby fergetransport, og derfor for inntektssystemet for fylkeskommunene. Dette systemet har som formål å kompensere fylkeskommunene for ufrivillige forskjeller i kostnader ved tjenesteproduksjon for å gjøre det mulig å tilby et ens tjenestetilbud i hele landet.

Som følge av disse endringene har Kommunal- og distriktsdepartementet (KDD) har bedt Transportøkonomisk institutt (TØI) om å utvikle en ny modell til å beregne kriteriet normerte fergekostnader i inntektssystemet til fylkeskommunene. Målet til dette prosjektet har derfor vært å utvikle en ny kostnadsmodell for nullutslippsferger og en ny inntektsmodell som legger AutoPASS-regulativet til grunn, samt å benytte de nye verktøyene til beregne kriteriet normerte fergekostnader i inntektssystemet for fylkeskommunene.

Prosjektet er bestilt av KDD og er utført av TØI, Paradis Nautica og Institutt for energiteknikk (IFE). Kenneth Løvold Rødseth (TØI) har ledet prosjektet, som er gjennomført i samarbeid med Bo Dong (TØI), Stian Jakobsen (Paradis Nautica) og Janis Danebergs (IFE). Prosjektet har mottatt bistand fra en referansegruppe oppnevnt av KDD og ekspertutvalget om inntektssystemet for fylkeskommunene. Forfatterne takker spesielt Kjetil Fagerholt (Norsk teknisk-naturvitenskaplige universitet), Trygve Haram (Statens vegvesen) og Lars-Tore Rydland (KDD) for gode innspill til prosjektarbeidet.

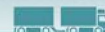
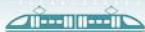
Denne rapporten er kvalitetssikret av Inger Beate Hovi (TØI).

Oslo, oktober 2022  
Transportøkonomisk institutt

Bjørne Grimsrud  
Administrerende direktør

Kjell W. Johansen  
Avdelingsleder





# Innhold

## Sammendrag

<b>1</b>	<b>Innledning.....</b>	<b>1</b>
1.1	Bakgrunn .....	1
1.2	Formål.....	2
1.3	Avgrensning.....	2
1.4	Rapportstruktur.....	2
1.5	Ordforklaring .....	3
<b>2</b>	<b>Gjeldende metodisk rammeverk.....</b>	<b>4</b>
2.1	Generelt om beregningen av normerte fergekostnader .....	4
2.2	Dagens kostnadsmodell .....	4
<b>3</b>	<b>Forslag til ny kostnadsmodell .....</b>	<b>8</b>
3.1	Problembeskrivelse .....	8
3.2	Notasjon .....	9
3.3	Modell med fast standard .....	11
3.4	Modell med optimert standard.....	18
<b>4</b>	<b>Forslag til ny inntektsmodell.....</b>	<b>20</b>
4.1	Datagrunnlag og databehandling.....	20
4.2	Modellspesifikasjon.....	21
4.3	Resultater .....	21
4.4	Anbefalinger .....	24
<b>5</b>	<b>Parametere og implementering av modellrammeverk .....</b>	<b>25</b>
5.1	Parametere for elferger .....	25
5.2	Enhetskostnader .....	28
5.3	Trafikkfordeling .....	32
5.4	Andre driftskostnader .....	32
<b>6</b>	<b>Beregning av kostnader, inntekter og kriterieverdier .....</b>	<b>34</b>
6.1	Kostnadsberegninger .....	34
6.2	Inntektsberegninger .....	40
6.3	Nettokostnader .....	41
6.4	Kriterieberegning .....	41
6.5	Sensitivitetstesting .....	42
<b>7</b>	<b>Oppsummering og konklusjon .....</b>	<b>44</b>
7.1	Drøfting av resultatene .....	44



7.2	Anbefalinger .....	45
<b>8</b>	<b>Referanser .....</b>	<b>47</b>
	<b>Vedlegg .....</b>	<b>48</b>
	V 1. GAMS-kode.....	48

# Revidert modell til beregning av fergekriteriet i inntektssystemet for fylkeskommunene

TØI rapport 1914/2022 • Forfattere: Kenneth Løvold Rødseth, Bo Dong, Stian Jakobsen, Janis Danebergs • Oslo 2022 • 72 sider

## Forskningsfunn/Hovedresultater:

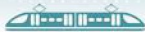
- Kommunal- og distriktsdepartementet (KDD) har bedt om en ny modell til å beregne kriteriet normerte fergekostnader i inntektssystemet for fylkene
- Utvikling av ny kostnadsmodell for nullutslippsferger ved bruk av optimering og ny inntektsmodell basert på AutoPASS-regulativet ved bruk av Minste Kvadraters metode
- Kostnadsmodellen gir noe lavere kostnadsanslag enn KDDs modell, mens inntektsmodellen gir noe høyere beregnede inntekter. Kriterieverdier beregnet med KDDs og ny metodikk avviker i liten grad
- Vi anbefaler å avvente implementeringen av kostnadsfunksjonen til utviklingen i nøkkelparametere som strømprisen er bedre kjent
- Vi anbefaler bruk av den nye inntektsmodellen som er enklere å oppdatere jevnlig enn KDDs nåværende modell

Kommunal- og distriktsdepartementet (KDD) har bedt Transportøkonomisk institutt (TØI) om å utvikle en ny modell til å beregne kriteriet normerte fergekostnader i inntektssystemet for fylkeskommunene. De viktigste utvidingene av eksisterende modell omhandler å etablere 1) en kostnadsmodell som legger til grunn bruk av nullutslippsteknologi og 2) en inntektsmodell som bygger på AutoPASS-regulativet. Denne rapporten beskriver resultater fra prosjektet om modellutviklingen.

## Bakgrunn for prosjektet

Inntektssystemet fordeler rammetilskudd og omfordeler skatteinntekter mellom fylkeskommunene. Systemet har som formål å kompensere fylkeskommunene for ufrivillige forskjeller i kostnader ved tjenesteproduksjon. I prinsippet skal fylkene få full kompensasjon for kostnadsforskjeller som de ikke kan påvirke, men i realiteten skjer





dette ved omfordeling av en økonomisk ramme mellom fylkeskommunene: Fylker som har et utgiftsbehov over landsgjennomsnittet, får et tillegg i rammetilskuddet, mens fylker som har et utgiftsbehov under landsgjennomsnittet, får et trekk.

Omfordelingen mellom fylkene beregnes ved hjelp av kostnadsnøkkelen, som består av ulike kriterier med vekt. Kriterier forklarer hvorfor kostnadene varierer mellom fylkeskommuner, mens vektene sier noe om hvor stor rolle de ulike faktorene spiller for forskjellene. Denne rapporten gir innspill til en revidert beregning av kriteriet normerte fergekostnader i inntektssystemet.

Årsaken til at det er ønskelig å vurdere en ny beregning av kriteriet er de store endringene i fergesektoren de seneste årene. Dette gjelder både innfasingen av lav- og nullutslippsferger og en overgang til AutoPASS-regulativet for fergetakster. Samlet trekker denne utviklingen i retning av endringer i operatørkostnader og brukerbetaling per samband. Dersom endringene påvirker fylkene ulikt vil en uendret beregning av kriteriet fergekostnader kunne komme i konflikt med målet om at fylkene skal kompenseres for kostnadsforskjeller som de ikke kan påvirke selv.

## Modellutvikling

Innen rammen av dette prosjektet er det utviklet en ny kostnadsmodell for nullutslippsferger og en ny modell til å beregne billettinntekter basert på AutoPASS-regulativet. Kostnadsmodellen finner lavest mulig operatørkostnader knyttet til å drifte et fergesamband med to kaier (pendelsamband). Den er et såkalt Mixed Integer Programming problem som benytter optimering til å finne de beste beslutningene om hvordan å betjene etterspørselen etter fergetransport. Modellen søker å ta de valgene om a) antall ladepunkter, b) ladeeffekt, c) fergetype (differensiert etter størrelse, batterikapasitet og fart), d) flåtestørrelse, e) antall skift på ulike tider av døgnet og f) antall rundturer per ferge på ulike tider av døgnet som gir lavest mulige kostnader for et gitt fergetilbud. Som en del av dette arbeidet er det utviklet 16 elfergetyper som modellen kan velge blant når den skal fatte sine beslutninger. Sentrale krav i modellen er at fergetilbudet skal være i stand til å møte a) etterspørselen etter fergetransport, b) normert driftsstandard, c) tilgjengelig ladeeffekt per kai og d) tidsbudsjettet. Den foreslåtte inntektsmodellen er basert på statistisk analyse (minste kvadraters metode) på fergeinntekter i samband som har innført AutoPASS-regulativet. Variasjoner i sambandenes inntekter er søkt forklart med variabler som beskriver deres rundturlengde, antall kaier, elbil- og tungbilandeler. Flere aktuelle spesifikasjoner av inntektsmodellen er blitt evaluert. Modellen som forklarer billettinntekter på bakgrunn av rundturlengde, antall kaier og elbilandel er valgt ut basert på kriterier for statistisk analyse. Denne modellen er også best på å forklare inntekter i samband med stor trafikk.

## Nye beregninger av kriteriet normerte fergekostnader

Vi benytter 5 ulike spesifikasjoner av kostnadsmodellen til å estimere årlige bruttokostnader per samband. Dette gjøres for å synliggjøre hvordan modellering av bibetingelser knyttet til fergenes kapasitet og fergestandarden påvirker resultatene. Spesifikasjonen er kalt MFM, Eksogen1, Eksogen2, Eksogen3 og Endogen i rapporten.



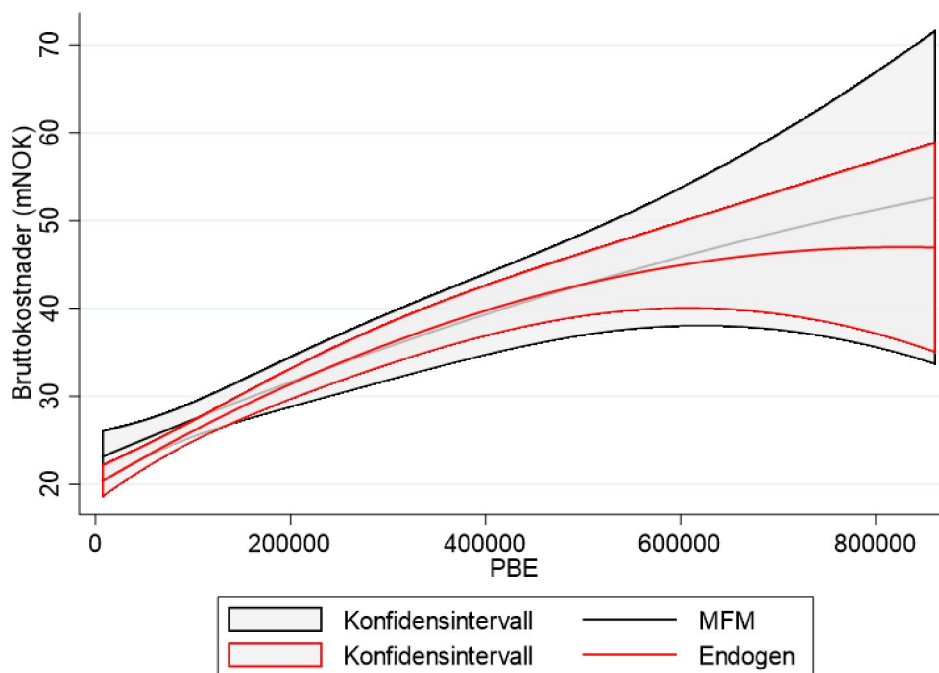
## Bruttokostnader

Fire av disse beregningene (MFM, Eksogen1, Eksogen2 og Eksogen3) legger til grunn KDDs fergestandard, som bestemmer antall avganger i døgnet basert på størrelsen på fergetrafikken og sambandets rundturlengde. Sammenliknende statistikk for resultatene fra disse modellene er vist i tabell S.1.

Tabell S.1: Oppsummerende statistikk om estimerte bruttokostnader (2021-mNOK) fra beregninger med fast fergestandard

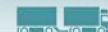
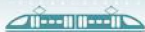
	MFM	Eksogen 1	Eksogen2	Eksogen 3
Gjennomsnitt	29.739	26.767	29.762	31.267
Standardavvik	15.287	9.756	15.335	17.564
Minimum	14.368	14.368	14.368	14.368
Maksimum	104.306	61.197	104.306	117.828

Det fremgår av tabell S.1 at modellen MFM er et medianalternativ blant beregningene basert på KDDs fergestandard. Den er også mest sammenliknbar med modellen KDD bruker i dag, og vi foretrekker derfor denne modellspesifikasjonen blant de fire modellene basert på fergestandarden.



Figur S.1: Sammenlikning av estimerte brutto operatørkostnader (2021-mNOK) med optimert (Endogen) og fast fergestandard (MFM).

Vi vurderer også en alternativ beregning hvor fergestandarden beregnes ved å veie operatørkostnader mot passasjerens ventetidskostnader. Denne modellen er kalt Endogen i rapporten, og resultater fra beregningene med Endogen er sammenliknet



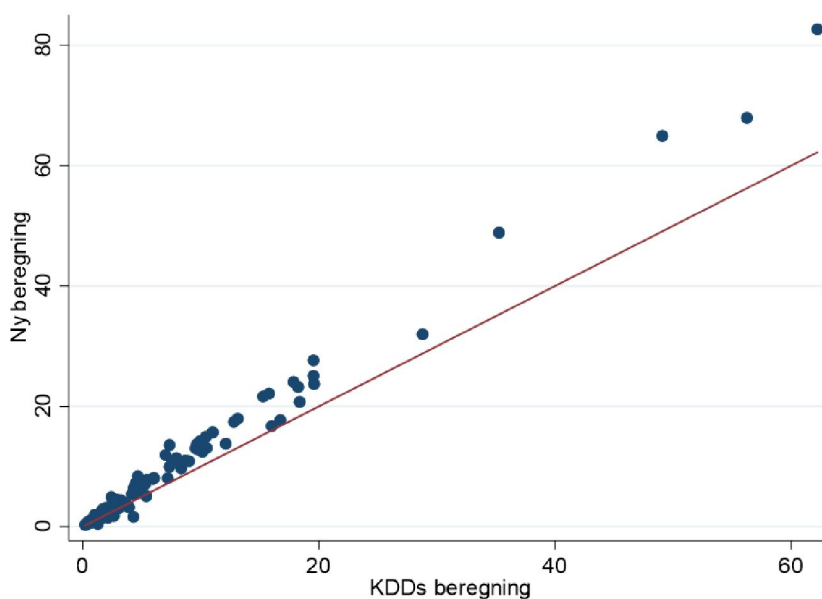
med MFM i figur S.1. Resultatene er i stor grad sammenfallende på tvers av modellene, men i gjennomsnitt ligger kostnader beregnet med Endogen noe lavere i tilfeller med høy eller lav trafikk enn kostnader beregnet med MFM.

En hovedhensikt med å vurdere modellen med optimert standard er å finne ut om elfergenes behov for økt tid i havn grunnet lading krever en reduksjon av den normerte fergestandarden til KDD. Selv om figur 1 viser at modellen Endogen legger til grunn en liten reduksjon av dagens standard for noen av sambandene virker ikke dette i hovedsak å kunne tilskrives ladeproblematikken.

I lyset av dette anbefaler vi å benytte modellen MFM som hovedalternativ til beregningen av fergekriteriet. Samtidig bør det understrekes at KDDs fergestandard bygger på en kartlegging av fylkenes subjektivt valgte servicenivåer, mens en avveining mellom operatør- og passasjerkostnader benytter samfunnsøkonomisk lønnsomhet som et objektive kriterium til å bestemme sambandenes og fylkenes inntektsbehov.

### *Inntekter*

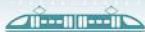
Figur S.2 sammenlikner den nye inntektsberegningen med KDD sin egen beregning av inntekter basert på etablert metodikk for beregning av kriteriet normerte fergekostnader. Den viser at KDD sine inntektsberegninger tenderer mot underestimering av billettinntekter etter innføringen av AutoPASS-direktivet.



*Figur S.2: Sammenlikning av ny inntektsberegning og KDDs egen inntektsberegning. 45-graderslinjen er vist i rødt.*

### *Nettokostnader*

Etter å ha beregnet både kostnader og inntekter trekkes inntektene fra bruttokostnadene for å beregne nettokostnader ved å tilby fergetransport. Den overordnede hensikten med analysen er å vise hvordan nettokostnadene ved fergetransport



varierer mellom fylkene etter innføringen av nullutslippskrav og AutoPASS-regulativet. Dette gjøres ved å summere opp nettokostnadene for alle de 107 sambandene som inngår i beregningen av fergekriteriet for deretter å beregne det enkelte fylkes andel av disse kostnadene.

KDDs egne beregninger og modellene MFM (fast fergestandard) og Endogen (optimert fergestandard) sine beregninger av det relative inntektsbehovet til fylkene er oppsummert av tabell S.2. Den viser at beregningen av kriteriet normerte fergekostnader med den nye metodikken og valgte parameterverdier gir sammenliknbare resultater som den eksisterende metodikken KDD bruker i dag.

*Tabell S.2: Fylkenes andeler av totale nettokostnader for alle samband som inngår i beregningen av kriteriet normerte fergekostnader*

	KDDs beregning	MFM	Endogen
Agder	0.006	0.011	0.013
Innlandet	0.004	0.006	0.008
Møre og Romsdal	0.166	0.143	0.143
Nordland	0.258	0.242	0.239
Rogaland	0.070	0.082	0.073
Troms og Finnmark	0.161	0.161	0.163
Trøndelag	0.080	0.090	0.087
Vestfold og Telemark	0.011	0.017	0.018
Vestland	0.242	0.244	0.251
Viken	0.002	0.003	0.004

## Anbefalinger

Med tanke på at en fullstendig omlegging av dagens metodikk til å beregne kriteriet normerte fergekostnader kan ha betydelige kostnader både for KDD og fylkene – f.eks. forbundet med å forstå og å anvende den nye modellen – anbefaler vi en videreføring av deler av eksisterende metodikk til beregning av normerte fergekostnader på kort sikt. Dette gjelder konkret for kostnadsmodellen siden den nye modellen er langt mer kompleks enn modellen KDD anvender og dermed kjenner godt i dag. Det er også betydelig usikkerhet knyttet til flere av parameterne i den nye kostnadsmodellen, som bl.a. teknologiutvikling og prisen på energi, noe som også trekker i retning av at det kan være hensiktsmessig å vente med innføringen av den nye kostnadsmodellen inntil man har mer kunnskap om denne utviklingen framover. På lengre sikt vil det være hensiktsmessig å revidere og å implementere en kostnadsmodell for nullutslippsferger i beregningen av normerte fergekostnader.

Denne rapporten foreslår en alternativ beregning av inntekter basert på regresjonsanalyse. Resultatene fra den alternative beregningen basert på AutoPASS-regulativet avviker noe fra KDDs egne resultater basert på riksfergeregulativet, samtidig som de nye inntektsberegningene er langt enklere å oppdatere jevnlig enn KDDs gjeldende metodikk. Vi anbefaler at den nye inntektsmodellen tas bruk i beregningen av normerte fergekostnader.



# 1 Innledning

## 1.1 Bakgrunn

Inntektssystemet fordeler rammetilskudd og omfordeler skatteinntekter mellom fylkeskommunene. Dette er frie inntekter som fylkene kan disponere fritt, og som utgjør hoveddelen av deres inntekter.

Inntektssystemet har som formål å kompensere fylkeskommunene for ufrivillige forskjeller i kostnader ved tjenesteproduksjon, eksempelvis knyttet til forskjeller i demografi eller befolkningstetthet. Hensikten er å gjøre det mulig å tilby innbyggerne et likeverdig tjenestetilbud i hele landet.

I prinsippet skal fylkene få full kompensasjon for kostnadsforskjeller som de ikke kan påvirke selv. Men i realiteten bestemmes rammen for overføringen til fylkene først og utgiftsutjevningen er i praksis en omfordeling av denne rammen mellom fylkeskommunene. Det betyr at fylker som har et utgiftsbehov over landsgjennomsnittet, får et *tillegg* i rammetilskuddet, mens fylker som har et utgiftsbehov under landsgjennomsnittet, får et *trekk*.

Omfordelingen mellom fylkene beregnes ved hjelp av kostnadsnøkkelen, som består av ulike kriterier med vekt. Kriterier er faktorer som kan forklare hvorfor kostnadene varierer mellom fylkeskommuner, mens vektene sier noe om hvor mye de ulike faktorene betyr for forskjellene. Utgiftsutjevningen omfatter videregående opplæring, tannhelse, fylkesvei og kollektivtransport (buss, bane, båt og ferge). Det er en egen delkostnadsnøkkel for hver sektor, og de ulike delkostnadsnøkklene er vektet sammen til en overordnet kostnadsnøkkel. Denne rapporten gir innspill til en revidert beregning av kriteriet *fergekostnader* i inntektssystemet.

Det har vært store endringer i passasjertransport til sjøs de senere årene. Myndighetenes klimaplan 2021-2030 foreslår krav om lav- og nullutslipp i nye anbud for ferger fra 2023 og for hurtigbåter fra 2025. Disse forslagene har nylig vært utredet av en arbeidsgruppe bestående av Direktoratet for forvaltning og økonomistyring, Miljødirektoratet og Sjøfartsdirektoratet på oppdrag fra Klima – og miljødepartementet. Per dags dato er det 63 elektriske bilferger i operasjon i Norge<sup>1</sup>, og 22. september ble også verdens første elektriske hurtigbåt døpt i Stavanger.

Også for fergetakster har det vært omfattende endringer. Som følge av overgangen til automatisk billettering har de fleste fergesamband nå tatt i bruk det såkalte AutoPASS-regulativet i stedet for riksregulativet for fergetakster. Denne omleggingen gjør at passasjerer uten kjøretøy reiser gratis. I tillegg har regjeringen lagt til rette for en generell reduksjon i fergetakster de siste årene, og fra og med andre halvår 2022 er det også lagt til rette for innføring av gratis ferge i samband med under 100 000 passasjerer årlig (jf. Prop. 110 S (2021–2022) Kommuneproposisjonen 2023). I forslaget til statsbudsjett for 2023, foreslår regjeringen en ytterligere reduksjon i fergetakstene fra august 2023, og en utvidelse

---

<sup>1</sup> Se [Elektriske bilferger i Norge – Energi og Klima](#) (søk datert 23.9.2022)

av ordningen med gratis ferge til også å omfatte ferger til øyer uten fastlandsforbindelse (jf. Prop. 1 S (2022–2023)).

Samlet trekker disse endringene i retning av endrede operatørkostnader og brukerbetaling per samband. Dersom disse endringene – som må sees som kostnads- og inntektsendringer som ligger utenfor fylkenes kontroll – påvirker fylkene ulikt vil en uendret beregning av kriteriet *fergekostnader* kunne komme i konflikt med målet om at fylkene skal kompenseres for kostnadsforskjeller som de ikke kan påvirke selv.

## 1.2 Formål

Kommunal- og distriktsdepartementet (KDD) har bedt Transportøkonomisk institutt (TØI) om å utvikle en ny modell til å beregne kriteriet *normerte fergekostnader* i inntektssystemet til fylkeskommunene. I henhold til KDD sitt oppdrag er de viktigste utvidelsene av eksisterende modell å etablere

- 1) en kostnadsmodell som legger til grunn bruk av nullutslippsteknologi
- 2) en inntektsmodell som bygger på AutoPASS-regulativet

KDD ber om at modellene skal overleveres i et format som er anvendelig for Oppdragsgiver, og som kan oppdateres årlig med utgangspunkt i Vegvesenets Fergedatabank. Som en del av prosjektet er det blitt utviklet en modell for minimering av operatørkostnader som er implementert i GAMS. For å sikre brukervennlighet er det utviklet et beregningsverktøy i Excel som lar brukeren operere kostnadsmodellen som en tradisjonell regnearksmodell.

Denne rapporten beskriver den nye modellen og beregner nye kriteverdier for normerte fergekostnader.

## 1.3 Avgrensning

KDD etterspør en revidering/videreutvikling at dagens metodikk for beregning av kriteriet normerte fergekostnader. Det bes altså ikke om en alternativ metodikk til det etablerte modellapparatet (eksempelvis en modell som ikke er sambandsbasert). Samtidig åpnes det opp for å vurdere tilpassinger av dagens metodikk ut over å inkludere nullutslipp og AutoPASS-regulativet. Oppdragsgiver nevner blant annet muligheter for å vurdere om bruk av nullutslippsteknologi kan eller bør ha konsekvenser for fergestandarden (dvs. et forhåndsbestemt tjenestetilbud per samband) som brukes til å bestemme sambandenes frekvens og åpningstid i kostnadsberegningen. Denne rapporten drøfter dette gjennom å utvikle en alternativ kostnadsmodell som bruker passasjerenes ventetidskostnader til å bestemme fergestandarden. Dette gjør det mulig å sammenlikne denne modellen med kostnadsberegningen basert på dagens fergestandard.

## 1.4 Rapportstruktur

Kapittel 2 gir en kort beskrivelse av dagens modell brukt til beregning av kriteriet normerte fergekostnader. Denne ligger i stor grad til grunn for den nye modellen som beskrives i de påfølgende kapitlene. Kapittel 3 gir en framstilling av den nye kostnadsmodellen mens kapittel 4 gir en beskrivelse av den nye inntektsmodellen. Kapittel 5 gir en oversikt over parametere og data som benyttes til beregningen av kostnader og inntekter, før kapittel 6



gir en beregning av normerte fergekostnader med den nye modellen. Kapittel 7 oppsummerer og konkluderer.

## 1.5 Ordforklaring

**Bruttokostnader:** Kostnader ved å operere et fergesamband

**Fartsområde:** Definert farvann en ferge kan trafikkere, som får direkte betydning for skipets konstruksjon, utrustning, bemanning og drift.

**General Algebraic Modeling System (GAMS):** Modelleringsystem for matematisk programmering og optimering

**Kilowatt (kW):** Måleenhet som brukes til å måle ladeeffekt, som bestemmer hvor raskt en ferge kan lades

**Kilowattimer (kWh):** Måleenhet for mengden energi som forbrukes, og som fremkommer ved å gange kW med antall ladetimer

**Minste kvadrates metode:** Estimeringsmetode for å finne den statistiske sammenhengen mellom en eller flere forklaringsvariabler og en responsvariabel.

**Nettokostnader:** Kostnader ved å operere et fergesamband fratrukket billettinntekter

**Personbilekvivalent (PBE):** Måleenheten som sier noe om hvor stor plass og hvor stor belastning det enkelte kjøretøy utgjør for fergen/fergedekket. Ved beregningen av omregningsfaktoren for PBE har en tatt hensyn til forhold som lengde, bredde og vekt på de ulike kjøretøy-/takstgruppene

**Planleggingsperiode:** En valgt tidsperiode som fergeoperasjonene skal gjennomføres i løpet av. Modellen legger typisk til grunn 8 timer som en planleggingsperiode, og deler driftsdøgnet inn i 3 planleggingsperioder (dag; kveld; og natt)

**Stata:** Programvarepakke for statistisk analyse



## 2 Gjeldende metodisk rammeverk

### 2.1 Generelt om beregningen av normerte fergekostnader

Kriteriet normerte fergekostnader ble innført i 2018, men det ble gjort noen justeringer av beregningene av kriteriet da inntektssystemet ble revidert i 2020. Dagens modell består av to moduler for henholdsvis kostnads- og inntektsberegning. Den gjeldende kostnadsmodellen er utviklet og dokumentert av Svendsen mfl. (2017). Justeringene som ble gjort i 2020 er beskrevet i Kommunal- og moderniseringsdepartementet (2019)<sup>2</sup> og ble lagt fram for Stortinget i Prop. 113 S (2018–2019) Kommuneproposisjonen 2020. Her beskrives blant annet den gjeldende modellen for estimering av billettinntektene per samband. Den nye modellen til å beregne kriteriet normerte fergekostnader er i stor grad basert på de samme rammene og antakelsene som dagens modell. Det er derfor viktig å gi en generell beskrivelse av denne metodikken innledningsvis i denne rapporten.

En prinsipiell forskjell mellom den etablerte metodikken og våre nye modellforslag er at den gjeldende kostnadsfunksjonen er basert på *stegvise* beslutninger om type og antall ferger som betjener sambandet, mens den nye modellen benytter et optimeringsverktøy til å fatte alle beslutninger simultant. Dette kan være en kilde til forskjeller mellom resultater fra bruken av de ulike verktøyene. For det første vil en stegvis beregning ikke nødvendigvis lede til et kostnadsminimum ettersom en slik beregning ikke er i stand til å gjøre en avveining mellom ulike valg (som f.eks. størrelse på ferge og antall ferger) som en del av optimeringsanalysen. For det andre tar ikke en stegvis beregning inn over seg at ulike skranker i optimeringsproblemet binder samtidig, og kan dermed lede til løsninger som ikke er teoretisk mulige i det overordnede optimeringsproblemet hvor alle skranker vurderes samtidig. En annen viktig forskjell er at dagens modellverktøy ikke tar hensyn til variasjoner i trafikk over døgnet, noe som legges til grunn i den nye modellen.

### 2.2 Dagens kostnadsmodell

Møreforsknings modell (dokumentert i Svendsen mfl., 2017) søker å beregne de lavest mulige operatørkostnader som kreves for å tilby et forhåndsbestemt fergetilbud per fylkeskommunalt fergesamband. Modellen beregner kostnader i flere steg.

#### 2.2.1 Steg 1: Standardklasser

Det første steget i modellen er å dele alle fylkeskommunale fergesamband inn i standardklasser basert på lengden og trafikkmengden på sambandet. Fokuset er på bilferger, og trafikkvolumer beregnes derfor i antall personbilenheter per årsdøgn (ÅDT PBE). PBE er en måleenhet som brukes til å regne andre typer kjøretøy (som kategorier tunge kjøretøy) om til et tilsvarende antall personbiler.

---

<sup>2</sup> Se vedlegg 3 til høringsnotatet Forslag til nytt inntektssystem for fylkeskommunene (Kommunal- og moderniseringsdepartementet, 2019)

Tabell 1 gir en oversikt over de 13 ulike standardklassene som benyttes i kostnadsberegningene. Hvert enkelt samband som skal kostnadsberegnes tilegnes en av klassene, og kostnadsberegningen for sambandene baseres da på den normerte fergestandarden. Med standard mener vi her hvor mange timer i døgnet sambandet er åpent, skilt etter ukedag og helg, samt hvor mange ganger hver kai skal besøkes i løpet av denne perioden. Dette vil vi generelt omtale som «antall rundturer» eller «frekvens» i det følgende.

Tabell 1: Standardklasser for fergesamband (Kilde: Data tilsendt av KDD)

ID	Klasse	Rundturer uke	Rundturer helg	Åpningstid uke	Åpningstid helg	Stiv frekvens	Intervall	Varighet Stiv frekvens
1	Fv1.1	48	48	24	24	1	0.5	12
2	Fv1.2	39	39	24	24	1	0.5	12
3	Fv2	31	27	18	16	0	-	-
4	Fv3.1	27	24	18	16	0	-	-
5	Fv3.2	17	15	18	16	0	-	-
6	Fv3.3	22	19	18	16	0	-	-
7	Fv4.1	21	19	16	15	0	-	-
8	Fv4.2	15	13	16	14	0	-	-
9	Fv4.3	9	7	16	14	0	-	-
10	Fv4.4	7	6	16	14	0	-	-
11	Fv5.1	7	7	14	14	0	-	-
12	Fv5.2	4	4	14	14	0	-	-
13	Fv5.3	5	5	14	14	0	-	-

Standardene er i stor grad basert på det historiske fergetilbudet (Statens vegvesen, 2018), og reflekterer i så måte fylkenes tidligere prioriteringer av fergetilbudet. Et spørsmål er hvorvidt disse standardene – som er basert på rutetabeller for dieselferger – er egnet ved overgangen til et transportsystem med et stort innslag av batteriferger, siden disse både har en annen kostnadsprofil og har økt behov for tid til lading i havn. Dette vil vi drøfte mer inngående i de følgende kapitlene.

### 2.2.2 Steg 2: Valg av ferge

I det andre steget beregnes først nødvendig fergestørrelse basert på ÅDT, frekvens og en antatt utnyttelsesgrad på fergene på 35 prosent. Den sistnevnte forutsetningen er basert på Jørgensen, Mathiesen og Solvoll (2007), og er benyttet for å fange opp variasjoner i trafikk over tid innad i sambandene.

Deretter velger modellen fergetype ut fra sambandets fartsområde og den beregnede fergestørrelsen. Modellen velger blant fergetypene som er spesifisert i tabell 2 og tabell 3. Modellen til Møreforskning bygger i utgangspunktet på fergekostnadsmodellen til Statens vegvesen, som er dokumentert i Statens vegvesen (2015). I tillegg til fergetypene som inngår i Vegvesenets modell har Møreforskning utviklet noen supplerende fergetyper, som vist i tabell 3.

Tabell 2: Fergetyper som inngår i Statens vegvesens EFFEKT-modell (Kilde: Svendsen mfl., 2017)

Fergetype	pbe	Farts- område	Innkjøpspris 2013		Beman- ning	Effekt kW	Fart knop	Drivst.- andel
			Diesel	Gass				
Kabelferje	20	1	35		1	300	5	0,5
Pendelferje	35	1, 2	50	60	3	1000	14	0,5
Pendelferje	50	1, 2	65	80	4	1500	14	0,5
Pendelferje	100	1, 2	110	130	4	2500	14	0,5
Pendelferje - Katamaran	112	1, 2	190		6	5500	22	0,5
Pendelferje	150	1, 2	170	205	6	3500	15	0,5
Pendelferje	200	1, 2	220	265	6	5000	15	0,5
Pendelferje	50	D	70	85	5	2000	14	0,5
Pendelferje	100	D	120	145	6	3000	14	0,5
Pendelferje	200	D	235	280	8	5000	15	0,5
Fjordferje	35	C	70	85	7	1800	14	0,5
Fjordferje	50	C	85	100	8	2500	14	0,5
Fjordferje	100	C	180	215	9	3500	14	0,5

Tabell 3: Fergetyper som inngår som supplement til Statens vegvesens EFFEKT-modell (Kilde: Svendsen mfl., 2017)

Fergetype	PBE	Fartsområde	Innkjøpspris 2013		Bemanning	Effekt kW	Fart knop	Drivstoff- andel
			Diesel	Gass				
<b>Nye 1</b>	120	1,2	135	136	5	2800	14	0,5
<b>Nye 2</b>	35	3	55	70	5	1200	14	0,5
<b>Nye 3</b>	50	5	85	100	5	1600	13	0,5

### 2.2.3 Steg 3: Valg av antall ferger

Etter å ha valgt fergetype velges antall ferger. Dette gjøres med utgangspunkt i å beregne forventet total tidsbruk til fergetransport i sambandets åpningstid, både hva gjelder tidsbruk under overfart, til ankomst og avgang og tidsbruk i havn. Tidsbruken til overfart beregnes basert på fergens seilingshastighet, som vist i tabell 2 og tabell 3. Samlet tid til ankomst og avgang (grunnet redusert seilingsfart) beregnes til ca 2.6 minutter per anløp. Som tidsbruk i havn antas 6 minutt for små ferger og 10 minutt for større ferger per kaianløp.

Basert på beregningen av tidsbruken gjøres det først en forenklet beregning av antall ferger på sambandet ved å dele total tidsbruk for alle operasjoner på normert åpningstid. For samband hvor det skal være «stiv frekvens», dvs. en avgang per halve time i et bestemt tidsrom, gjøres en tilleggsberegning basert på minste mulige tid mellom avganger.

Merk at disse beregningene normalt vil gi et tall med desimaler, og at man derfor må runde av for å kunne bestemme antall ferger som betjener det enkelte samband. Denne tilnærmingen er fundamentalt forskjellig fra optimeringsproblemet vi presenterer i kapittel 3, hvor vi benytter en heltallsvariabel til å velge antall ferger.

### 2.2.4 Steg 4: Beregning av bruttokostnader

Etter at man har valgt type og antall ferger kan drifts- og investeringskostnader beregnes basert på informasjonen fra tabell 2 og tabell 3.

1. Drivstoffkostnadene beregnes basert på årlig normert utseilt distanse (dvs., normert frekvens ganget med sambandslengde) per ferge og antall ferger, ved å benytte informasjon om motoreffekt fra tabell 2 og tabell 3.
2. Lønnskostnadene beregnes ut fra blant annet antall ferger, antall skift per ferge (antatt ut fra åpningstid), fergetype (som stiller krav til minimumsbemanning) og gjennomsnittlige lønnskostnader.
3. Kapitalkostnadene beregnes ut fra antatt innkjøpspris for fergetypen, med en avskrivningstid på 30 år og en kalkulasjonsrente på 4 prosent.
4. Til slutt skaleres drivstoffkostnadene opp med en faktor på (1/0.45) hvis valg av 1 ferge, (1/0.6) ved valg av 2 ferger, og (1/0.7) ved valg av 3 eller flere ferger. Dette har til hensikt å fange opp andre driftskostnader (utenom drivstoff og mannskapskostnader) ved fergedriften.

Summen av de 4 kostnadskomponentene gir *bruttokostnader* per fergesamband.

### 2.2.5 Steg 5: Beregning av nettokostnader

I det femte steget trekkes billettinntektene fra bruttokostnadene. Inntektene beregnes ved å multiplisere antall kjøretøy per takstgruppe med normert takst i hht takstregulativet, samt med en gjennomsnittlig rabattsats per takstgruppe.

Til slutt summeres *nettokostnadene* opp til fylkesnivå, og resultatet brukes som kriteriedata i inntektssystemet.

## 3 Forslag til ny kostnadsmodell

### 3.1 Problembeskrivelse

I det følgende presenterer vi en kostnadsmodell for et samband med kun 2 kaier (pendel-samband), slik også er tilfelle for den gjeldene kostnadsmodellen presentert i kapittel 2. Som tidligere beskrevet er en sentral forskjell mellom den nye og den gjeldende kostnadsmodellen at den sistnevnte baserer seg på stegvise beregninger mens den nye modellen benytter optimering. En annen forskjell er at vi i det følgende spesifiserer to modeller; En modell som legges nært opp til den etablerte modellen, spesielt gjennom å benytte matrisen i Tabell 1 til å beregne fergetilbudet. Vi omtaler denne som modell med «fast standard». I tillegg til denne modellen foreslår vi også en alternativ modell hvor rutetilbudet (dvs. frekvens) optimeres ved å veie operatørkostnader mot de reisendes ventetidskostnader. Dette kan være spesielt relevant med en overgang til batterielektriske ferger fordi disse trenger ekstra tid knyttet til lading og kan derfor ha utfordringer med å gjennomføre ruteplaner for dieselferger.

En oversikt over notasjon brukt til å beskrive modellene er gitt i kapittel 3.2. Merk at flere av parameterne i modellene i de påfølgende kapitlene vil variere over samband. For eksempel vil energibehovet til fartøy  $v$  for å gjennomføre en rundtur ( $Ev$ ) være avhengig av hvor lang seilingsdistansen til den enkelte ruten er. For å forenkle notasjonen velger vi å ikke lage en egen indeks for samband i det følgende (dette fordi vi vil løse modellen iterativt for hvert samband), men det er allikevel viktig å huske på at disse varierer mellom samband. Spesielt viktig er at sambandets fartsområde ( $1/2$ , C eller D) er bestemmende for hvilke kapital- og arbeidskraftskostnader som benyttes i beregningen.

I forhold til den etablerte fergemodellen gir vår modell en mer inngående beskrivelse av hvordan fergetrafikken varierer over tid. Den omfatter to representative årsdøgn; en virkedag og en helgedag. Disse brytes videre ned etter tid på døgnet. Hensikten er å modellere at sambandene må gjøre strategiske valg av fergemateriell som på best mulig måte avveier perioder med over- og underkapasitet i sambandet.

Formelt opererer vi med indeksen  $T$  som dekker planleggingsperiodene i modellen. Vi antar i utgangspunktet (opptil) 6 planleggingsperioder. Dette er

- Ukedag (subskript U)
- Helg (subskript H)

Hvor hver av disse deles inn i

- Dag: 07-15
- Kveld: 15-23
- Natt: 23-07

Denne inndelingen gjør det mulig å studere variasjoner i etterspørselen over driftsdøgnet og også å skille mellom antall avganger og skift (hvor ett skift normalt opererer 8 timer) som er nødvendig på ulike tider av døgnet. Typisk vil etterspørselen på dagen være langt høyere enn på kveld og natt, noe som gir et behov for et mer høyfrekvent tilbud i den perioden. Typisk er perioden kl. 15-16 travlest, noe som innebærer at høylasttimene deles mellom dag og kveld i modellen.

Sambandenes åpningstider baseres på fergestandarden i tabell 1. Vi legger til grunn at et samband med åpningstid på 16 timer opererer dag og kveld. Et samband med åpningstid på 24 timer operer dag, kveld og natt. I tilfeller hvor sambandets åpningstid (angitt av fergestandarden) er kortere enn hhv 16 eller 24 timer vil dette gjøres seg utslag i at varigheten  $\bar{T}_t$  settes kortere enn 8 timer på hhv kvelden og natten.

De viktigste beslutningene til fergemodellen er å velge type og antall ferger og deres frekvenser i hver planleggingsperiode (dag; ettermiddag; kveld). Dette modelleres ved at det finnes sett  $V$  (fartøystyper),  $Y$  (antall ferger) og  $F$  (antall rundturer per ferge) som modellen kan velge fra.

Rekkevidde blir en sentral problemstilling når man skal modellere batterielektriske ferger. Et viktig skille er derfor mellom  $V^{TOT}$  og  $V$ , hvor det førstnevnte settet definerer alle fergene som totalt inngår i modellen (dvs. alle mulig kandidatfartøy) mens det sistnevnte omfatter kun fergene som er i stand til å betjene det enkelte sambandet som analyseres. Betingelsen for dette er  $0.6 \cdot C_v \geq E_v / N$ , dvs. at mengden energi som kan lagres i batteriet til fartøy  $v$  er tilstrekkelig til å betjene rundturen som inngår i sambandet som analyseres. Vi gjør denne vurderingen med lading på hhv. en ( $N=1$ ) og begge ( $N=2$ ) kaiene i pendelsambandet.

Vi vil i det følgende redegjøre for matematisk notasjon og deretter alle komponentene i den foreslåtte kostnadsmodellen.

## 3.2 Notasjon

### Sett

$V^{TOT}$  er settet av alle fartøy

$V$  er settet av utvalgte fartøy per samband

$Y$  er settet av flåtestørrelser

$F$  er settet av mulige frekvenser per ferge

$T$  er settet av planleggingsperioder

$T_U$  er settet av planleggingsperioder for ukedager (dag; kveld; natt)

$T_H$  er settet av planleggingsperioder for helg (dag; kveld; natt)

$T_{SF}$  er settet av planleggingsperioder med stiv frekvens

$S$  er settet av aktuelle ladeeffekter for infrastruktur på land

### Parametere

$D$  er antall personbilekvivalenter per år

$D_U$  er antall personbilekvivalenter (i løpet av et virkedøgn)

$D_H$  er antall personbilekvivalenter (i løpet av et helgedøgn)

$A_t$  er andelen av ÅDT i planleggingsperiode  $t$

$\bar{T}_t$  er lengden på planleggingsperiode  $t$

$T_t^L$  er en justering på arbeidskraftkostnader for planperioder på 2 timer eller mindre (faktor: 2/8)

$T_v$  er tiden fartøy  $v$  benytter til å gjennomføre en rundtur (=KM\*(1/Fart<sub>v</sub>))

$T_v^q$  er tiden hvert anløp tar med fergetype  $v$ , inkl. tid til å legge til (merk: 2 anløp per rundtur)

$T^o$  er tid til ankomst og avreise

$R_U$  er antall avganger per ukedag (fergestandard)

$R_H$  er antall avganger per helgedag (fergestandard)

$R_{SF}$  er antall avganger per planleggingsperiode under stiv frekvens (fergestandard)

$P_v$  er PBE-kapasiteten til fartøy  $v$

$C_v$  er batterikapasiteten til fartøy  $v$

$Z_v$  er maksimal ladeeffekt for fartøy  $v$

$X_v$  er årlige kapitalkostnader for fartøy  $v$ , inklusiv annuitet av batterier

$L_v^{Sr}$  er bemanning (overstilling) for fartøy  $v$

$L_v^{Jr}$  er bemanning (understilling) for fartøy  $v$

$E_v$  er energiforbruk (kWh) for å gjennomføre rundturen med fartøy  $v$

$W$  er kroner per enhet energiforbruk (kWh)

$H$  er tidsverdi (kr/time)

$I$  er faste investeringskostnader knyttet til ladeinfrastruktur (kr/mW)

$Q^{Sr}$  er lønnskostnader per time (overstilling)

$Q^{Jr}$  er lønnskostnader per time (understilling)

$N$  er antall ladepunkter (1 eller 2)

### Variabler

$\gamma_s$  velger ladeeffekt for infrastruktur (binær)

$\lambda_v$  velger fartøystype (binær)

$\theta_y$  velger flåtestørrelse (binær)

$y_v$  velger total flåtestørrelse (heltallsvariabel)

$y_{vt}^T$  velger flåtestørrelse i planleggingsperiode  $t$  (heltallsvariabel)



$\delta_{yfv}$  velger flåtestørrelse  $y$ , frekvens  $f$  og fartøystype  $v$  i planleggingsperiode  $t$  (binær)

### 3.3 Modell med fast standard

#### 3.3.1 Målfunksjon

Vi legger i denne modellen til grunn minimering av årlige operatørkostnader forutsatt 251 virkedager og 114 helgedager per år. I likhet med den eksisterende kostnadsmodellen består operatørkostnadene av kapitalkostnad for ferge og driftskostnader knyttet til energi, mannskap og andre driftskostnader. Siden den nye modellen legger til grunn at alle operasjoner skjer med batterielektriske ferger inneholder den også et kostnadsledd for kapitalkostnader for ladeinfrastruktur på land. Dette leddet beregnes som en annuitet med 30 års avskrivningstid, på linje med kapitalkostnader for fergemateriell. Vi viser til kapittel 5 for en dokumentasjon av verdiene til alle parametere som inngår i kostnadsberegningene.

$$\begin{aligned}
 & \underbrace{NI \sum_{s \in S} s \gamma_s}_{\text{Kapitalkostnader infrastruktur}} + \underbrace{\sum_{v \in V} X_v y_v}_{\text{Kapitalkostnader fartøy}} \\
 & + 251W \underbrace{\sum_{v \in V} \sum_{t \in T_U} E_v n_{vt}}_{\text{Energikostnader ukedager}} + 114W \underbrace{\sum_{v \in V} \sum_{t \in T_H} E_v n_{vt}}_{\text{Energikostnader helg}} \\
 & + 251 \left( \underbrace{Q^{Sr} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T_U} T_t^L L_v^{Sr} y_{vt}^T}_{\text{Mannskapskostnad senior}} + \underbrace{Q^{Jr} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T_U} T_t^L L_v^{Jr} y_{vt}^T}_{\text{Mannskapskostnad junior}} \right) \quad [1] \\
 & + 114 \times 1.1875 \left( \underbrace{Q^{Sr} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T_H} T_t^L L_v^{Sr} y_{vt}^T}_{\text{Mannskapskostnad senior}} + \underbrace{Q^{Jr} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T_H} T_t^L L_v^{Jr} y_{vt}^T}_{\text{Mannskapskostnad junior}} \right) \\
 & + \underbrace{Q}_{\text{Andre driftskostnader}}
 \end{aligned}$$

Operatørens kostnader kan beskrives nærmere som følger:

1. Infrastrukturkostnader framkommer ved å gange kostnaden for installert effekt ( $I$ ) med valgt installert effekt ( $s$ ). Merk at vi benytter parameteren  $N$  til å modellere hvorvidt det installeres infrastruktur bare på en kai ( $N=1$ ) eller på to kaier ( $N=2$ ). Modellen løses iterativt for begge tilfellene, og den billigste løsningen velges.
2. Faste fartøyskostnader omfatter kapitalkostnader for den totale flåten som velges.

Vår modell forutsetter at det kun velges en fergetype fra settet  $V$  per samband, men at man kan velge flere ferger av samme type.

3. Energikostnader omfatter utgifter til strøm. Disse framkommer ved å gange energipris ( $W$ ) og energiforbruk per rundtur ( $E_v$ ) med totalt antall rundturer per periode  $n_{vt}$  (dvs. antall fartøyer i drift ganget med frekvens per fartøy). Energikostnader defineres separat for helg og ukedager, og det anslås å være 251 ukedager og 114 helgedager per år.
4. Mannskapskostnader framkommer ved å gange dagslønn  $Q$  per stillingskategori (offiserer og annet personell; omtalt som hhv. senior- og juniorpersonell i likning 1) med antall ansatte  $L$  og antall ferger  $y$  i drift i hver av planleggingsperiodene. Merk at vi i løsningen tillater at antall fartøy som benyttes i hver periode er lavere enn den totale flåten (dette er skillet mellom  $y_v$  (total flåte) og  $y_{vt}^T$  (antall fartøy i drift i periode  $t$ )). Merk videre at minimumsbemanningen per stillingskategori varierer over fartøystype  $v$  og etter fartsområde. Basert på Tveter mfl. (2020) forutsetter vi helgedagsgodtgjørelse beregnet med faktoren 1.1875. Siden modellen tillater at det brukes ulikt antall ferger i hver planleggingsperiode kan bemanningen variere over dag, kveld og natt, samt over ukedager og helg.

Det kan bemerkes at arbeids- og hviletidsbestemmelse for sjøfolk sier at normalarbeidstiden skal være 8 timer per døgn, men at det er muligheter for at skift varer i over 8 timer. For å fange opp denne fleksibiliteten i modellen forutsetter vi lønnskostnadene i planleggingsperioder med to eller færre timer åpningstid beregnes ved å gange lønnskostnadene per 8 timer med faktoren (2/8). Det betyr at en kort planleggingsperiode ikke utløser ekstra skift, men at det kun godtgjøres for timene sambandet er i drift.

5. Andre driftskostnader regnes som en andel av energikostnadene. Vi benytter her tilsvarende opplegg som i den eksisterende kostnadsmodellen, dvs at andelen avhenger av flåtestørrelsen.

Målet til modellen er å velge type ferge, antall ferger og fergenes frekvens slik at de samlede kostnadene som inngår i målfunksjonen blir lavest mulig. Dette valget må fattes på bakgrunn av alle relevante skranker eller bibetingelser som påvirker eller stiller krav til fergetilbudet. I det følgende beskriver vi disse betingelsene.

### 3.3.2 Bibetingelser

#### 1. Personbilkapasitet

Den første bibetingelsen er at tilbudt personbilkapasitet må være tilstrekkelig til å betjene etterspørselen i alle planleggingsperioder (dvs. både på dag, kveld og natt og for hverdager og i helgen).

$$\begin{aligned}
 \underbrace{\sum_{v \in V} P_v n_{vt}}_{\text{Tilbud}} &\geq \underbrace{0.5 A_t D_U}_{\text{Etterspørsel}}, \forall t \in T_U \\
 \underbrace{\sum_{v \in V} P_v n_{vt}}_{\text{Tilbud}} &\geq \underbrace{0.5 A_t D_H}_{\text{Etterspørsel}}, \forall t \in T_H
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Denne betingelsen sier at tilbudt fergekapasitet må være i stand til å betjene den samlede etterspørselen per planleggingsperiode. Den ser ikke konkret på hvordan trafikken fordeles innad i hver periode, og tar heller ikke hensyn til ulempe knyttet til ventetid og/eller gjenstående trafikk. Måter å håndtere dette på vil bli drøftet i delkapitlet omhandlende kapasitetsutnyttelse og i kapittel 3.4.

Merk her at  $A_t$  er andelen av ÅDT per planleggingsperiode (dvs. per 8 timer).  $A$  summeres til 1 over alle planleggingsperioder i et virkedøgn (dvs. per 24 timer). Siden en rundtur betjener to kaier deles etterspørselen på 0.5. Det betyr f.eks. at dersom det er 100 reisende i et samband per planleggingsperiode antar vi at det er kun 50 reisende per kai. Det er følgelig dette antallet fergekapasiteten skal dimensjoneres etter.

Et annet viktig poeng er at helgetrafikken typisk er lavere enn i ukedagene. Vi baker derfor inn i  $D_H$  en redusert trafikkmengde (relativt til normal ÅDT) i helgen. Basert på Oslo Economics (2021) antar vi helgetrafikken å være 80 prosent av normal ÅDT i alle våre beregninger. Merk at det vil være mulig å beregne ÅDT *uke* og ÅDT *helg* direkte per samband fra fergedatabanken (dvs. ved å dele samlet uketrafikk på 251 og samlet helgetrafikk på 114) dersom dette er ønskelig.

Dette modelloppsettet innebærer at flåten vil dimensjoneres for å betjene peak-perioden, og at det følgelig vil være ledig kapasitet resten av døgnet. Det vil også være mulig utvide beregningene til å inkludere sesongvariasjon (dvs. variasjon i trafikkmengden over året) eller retningsubalanse (dvs. at etterspørselen er ujevnt fordelt mellom kaier eller avganger). Vi foreslår at KDD kan vurdere slike utvidelser i sitt videre arbeid med modellen.

## Kapasitetsutnyttelse

I dagens fergemodell håndteres ikke døgnvariasjoner på tilsvarende måte som i likning 2, men det antas at fergenes kapasitetsutnyttelse er 35% over driftsdøgnet. En slik forutsetning kan også legges inn i den nye modellen. Betingelsen kan gjelde over driftsdøgnet:

$$\begin{aligned}
 0.35 \times \underbrace{\sum_{v \in V} \sum_{t \in T_U} P_v n_{vt}}_{\text{Kapasitet per driftsdøgn}} &\geq \underbrace{0.5 D_U}_{\text{Etterspørsel ÅDT}} \\
 0.35 \times \underbrace{\sum_{v \in V} \sum_{t \in T_H} P_v n_{vt}}_{\text{Kapasitet per driftsdøgn}} &\geq \underbrace{0.5 D_H}_{\text{Etterspørsel ÅDT helg}}
 \end{aligned}
 \tag{3a}$$

Eller i hver enkelt planleggingsperiode

$$\begin{aligned}
 0.35 \times \underbrace{\sum_{v \in V} P_v n_{vt}}_{\text{Kapasitet per driftsdøgn}} &\geq \underbrace{0.5 D_U}_{\text{Etterspørsel ÅDT}}, \forall t \in T_U \\
 0.35 \times \underbrace{\sum_{v \in V} P_v n_{vt}}_{\text{Kapasitet per driftsdøgn}} &\geq \underbrace{0.5 D_H}_{\text{Etterspørsel ÅDT helg}}, \forall t \in T_H
 \end{aligned}
 \tag{3b}$$

I kapittel 6 estimerer vi kostnadsmodellen under ulike kombinasjoner av skrankene i likningene 2 og 3 for å vurdere i hvilken grad antakelsene om kapasitetsbehov og kapasitetsutnyttning påvirker kostnadsminimumet.

## 2. Fergestandard

Fergestandarden som ligger til grunn for modellen KDD benytter i dag kan implementeres i den nye modellen ved hjelp av følgende likningssett:

$$\begin{aligned}
 \underbrace{\sum_{v \in V} \sum_{t \in T_U} n_{vt}}_{\text{Antall avganger per kai per døgn}} &\geq \underbrace{R_U}_{\text{Normert antall avganger}} \\
 \underbrace{\sum_{v \in V} \sum_{t \in T_H} n_{vt}}_{\text{Antall avganger per kai per døgn}} &\geq \underbrace{R_H}_{\text{Normert antall avganger}}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Disse betingelsene sikrer at antall avganger per kai per døgn tilsvarer fergestandarden, som definert av tabell 1. Merk at modellen står fritt til å allokere antall avganger mellom dag, kveld og natt på en kostnadseffektiv måte ettersom denne inndelingen ikke er spesifisert av fergestandarden.

I de tilfellene hvor man skal ha «stiv frekvens» (dvs. en avgang per halve time i et bestemt tidsintervall; jf. tabell 1) må man lage en ekstra skranke. Siden vår planleggingsperiode (eks. på dagen) er 8 timer innebærer halvtimesruter at man må ha 16 avganger i planleggingsperioden for å møte kravet om halvtimesruter (dvs.  $8/16 = 0.5$ ). Ved stiv frekvens er altså kravet at:

$$\underbrace{\sum_{v \in V} n_{vt}}_{\text{Antall avganger per kai per døgn}} \geq \underbrace{R_{SF}}_{\text{Antall normerte avganger under "stiv frekvens"}}, \forall t \in T_{SF}
 \tag{5}$$

### 3. Nettkapasitet

Den nye modellen beregner kostnadseffektiv installasjon av ladeinfrastruktur på land på bakgrunn av fergetransportens energibehov og tid tilgjengelig til lading. Modellen beregner et normert infrastrukturbehov og legger ikke til grunn faktisk tilgjengelig ladekapasitet i det enkelte samband.

Det følgende likningssettet pålegger sentrale begrensninger for valget av ladeløsning:

$$\underbrace{\sum_{s \in \mathbf{S}} s \gamma_s}_{\text{Infrastrukturkapasitet (kW)}} \times \underbrace{v_t}_{\text{Ladetid}} \geq \underbrace{\sum_{v \in \mathbf{V}} E_v n_{vt}}_{\text{Energibehov (kWh)}}, \forall t \in \mathbf{T} \quad [6]$$

$$\sum_{s \in \mathbf{S}} s \gamma_s \leq \sum_{v \in \mathbf{V}} Z_v \lambda_v$$

Denne skranken sier at installert effekt (målt i kW) må være tilstrekkelig til å betjene fartøyet som velges. Skranken er todelt:

1. Ladetiden settes større eller lik tiden som kreves til lading (dvs. energibehov (kWh) delt på infrastrukturkapasitet (kW)).
2. Installert nettkapasitet kan ikke overstige fergens maksimale ladeeffekt ( $M_v$ ) eller den teoretiske grensen til ladeinfrastrukturen (satt til 20MW). Den siste betingelsen pålegges indirekte gjennom størrelsen på settet av ladeeffekter, dvs.  $\mathbf{S}$ . Det betyr mao at fartøyets og infrastrukturens makseffekt setter en begrensning for hvor raskt man kan lade fergen.

De første ulikhetene i likning 6 er ikke-lineære siden to variabler ganges sammen. For å kunne løse problemet må vi derfor linearisere denne bibetingelsen. Vi bytter ut ulikhetene med likningssettet i likning 7:

$$\sum_{s \in \mathbf{S}} s \beta_{st}^1 \geq \sum_{v \in \mathbf{V}} E_v n_{vt}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\beta_{st}^1 \leq M_1 \gamma_s, \forall s \in \mathbf{S}, t \in \mathbf{T} \quad [7]$$

$$\beta_{st}^1 \in \mathfrak{R}_+, \forall s \in \mathbf{S}, t \in \mathbf{T}$$

Hvor  $M_1$  er produktet av største mulige ladeeffekt og største tilgjengelig ladetid. Innen operasjonsanalysen omtales dette som en «big-M» parameter som sikrer at bibetingelsene kun er bindende i tilfellet hvor variabelen  $\gamma_s$  tar verdien 1.

### 4. Tidskapasitet

Tidskapasitetsbetingelsene sier at hver ferge må kunne gjennomføre alle sine planlagte operasjoner innen hver av planleggingsperiodene.



$$\underbrace{\sum_{v \in V} (T_v + 2(T^o + T_v^q)) n_v}_{\text{Transporttid og anløpstid}} + \underbrace{\alpha_t}_{\text{Netto ladetid}} \leq \bar{T}_t \sum_v y_v^t, \forall t \in T$$

$$\alpha_t \geq \underbrace{\sum_{s \in S} \beta_s^1}_{\text{Ladetid}} - 2 \underbrace{\sum_{v \in V} T_v^q n_v}_{\text{Laste-/lossetid}}, \forall t \in T \quad [8]$$

$$\alpha_t \geq 0, \forall t \in T$$

De følgende størrelsene inngår i disse betingelsene:

- *Transporttid*: Hver ferge seiler med en konstant hastighet.  $T_v$  gjenspeiler her  $(1/\text{fart}_v) * \text{KM}$  = tidsbruk på rundtur for fartøy  $v$ .
- *Anløpstid*:  $T^q$  er et fast tidsledd for lasting og lossing av biler (dvs. 6 minutt for mindre ferger og 10 minutter for større ferger) og  $T^o$  er tid til ankomst og avreise. Merk at vi regner inn to anløp per rundtur.
- *Netto ladetid*: Denne fremkommer ved å trekke laste-/lossetiden fra total ladetid (jf. skranker for infrastrukturkapasitet). Merk at ladetid kun legges til dersom ladetiden overstiger laste-/lossetiden, noe som sikres av tilleggsbetingelsene i likning 8.

Vi ser av likning 8 at jo lenger en rundtur er (dvs. jo større  $T_v$  er), dess mindre tid er det tilgjengelig til lading. For å imøtegå dette problemet kan modellen velge å installere kraftigere infrastruktur på land for å kunne lade raskere.

Tidskapasiteten kan påvirke installert ladeeffekt eller antall ferger som behøves for å betjene sambandet. I framtiden kan det bli mer vanlig med såkalt batteribytte for elferger som kan bidra til å redusere ladetiden betraktelig. Vi har ikke vurdert slike løsninger i denne rapporten, men modellerer konvensjonell fergelading.

## 5. Total flåtestørrelse

Vi tillater i hver periode at kun en del av den totale flåten blir brukt. Dette er for å sikre at lønnskostnadene blir så lave som mulig siden skift kun regnes ut fra antall ferger i drift per planleggingsperiode. Vi antar ikke noen kostnader til opplag av fergene utenom ordinær ruteproduksjon.

$$y_v^t \leq y_v, \forall t \in T$$

$$\forall \lambda_v \geq y_v, \forall v \in V \quad [9]$$

Disse skrankene har ingen annen funksjon enn å sette riktig antall ferger når kapitalkostnader skal beregnes i målfunksjonen. Det siste settet av ulikheter i likning 9 sikrer at modellen kun velger en fergetype.

## 6. Andre driftskostnader

Til slutt beregnes andre driftskostnader på følgende måte:

$$\begin{aligned}
 o &\geq O_y 251 \underbrace{\sum_{t \in T_U} \sum_{v \in V} W_v E_v n_{vt}}_{\text{Energikostnader ukedager}} + O_y 114 \underbrace{\sum_{t \in T_H} \sum_{v \in V} W_v E_v n_{vt}}_{\text{Energikostnader helg}} - M_2 (1 - \theta_y), \forall y \in Y \\
 \sum_{y \in Y} y \theta_y &= \sum_{v \in V} y_v \\
 \sum_{y \in Y} \theta_y &= 1
 \end{aligned} \tag{10}$$

Andre driftskostnader beregnes som en andel av energikostnadene. Dette er tilsvarende den eksisterende fergemodellen. Vi benytter følgelig tilsvarende parametere ( $O$ ) som i den gamle modellen til å beregne disse kostnadene, dog med en generell justering for endret drivstoffeffektivitet for elferger.

Siden andelen brukt til å beregne andre driftskostnader antas å variere etter antall ferger i bruk i sambandet må vi benytte binærvariabelen  $\theta_y$  til å regne riktig kostnadsmultiplikator.

Denne tar verdien 1 dersom antall ferger i drift er  $y$ , og null ellers. Restriksjonene i likning 10 sikrer at vi benytter riktig kostnadsmultiplikator i kostnadsberegningen, alt etter størrelsen på flåten som modellen velger.

$M_2$  er en såkalt Big-M parameter som kan settes lik de største mulige andre driftskostnadene per samband for å sikre at leddet  $M^1 (1 - \theta_y)$  alltid er større eller lik de potensielle andre driftskostnadene, med unntak av når  $\theta_y = 1$ .

## 7. Linearisering

Avslutningsvis definerer vi et sett av variabler som lar oss beholde de foregående likningene som lineære. Målet med dette er å redusere tiden det tar å løse modellen med en kommersiell solver. Vi går ikke inn i detaljene for det følgende likningssystemet, som binder de ulike variablene sammen. Likningssystemet må sees i sammenheng med likning 9 for å få en komplett sammenheng mellom variablene i modellen.

$$\begin{aligned}
 n_{vt} &= \sum_{y \in Y} \sum_{f \in F} y f \delta_{fvt}, \forall v \in V, t \in T \\
 y_{vt}^T &= \sum_{y \in Y} \sum_{f \in F} y \delta_{fvt}, \forall v \in V, t \in T \\
 \sum_{y \in Y} \sum_{f \in F} \sum_{t \in T} \delta_{yft} &\leq T \lambda_v, \forall v \in V \\
 \sum_{y \in Y} \sum_{f \in F} \sum_{v \in V} \delta_{yft} &= 1, \forall t \in T \\
 \sum_{v \in V} \lambda_v &= 1 \\
 \sum_{s \in S} \gamma_s &= 1
 \end{aligned} \tag{11}$$



Likningssystemet sikrer at det kun velges en type fartøy per samband, og at det kun velges en servicefrekvens per planleggingsperiode.

### 8. Beslutningsbetingelser og variabeldefinisjon

Til slutt definerer vi variablene som inngår i modellen.

$$\begin{aligned}
 \gamma_s &\in \{0,1\} \\
 \lambda_v &\in \{0,1\} \\
 \delta_{yft} &\in \{0,1\} \\
 \theta_y &\in \{0,1\} \\
 y_v &\in \begin{matrix} V \\ + \end{matrix} \\
 y_{vt}^T &\in \begin{matrix} V \times 6 \\ + \end{matrix} \\
 n_{vt} &\in \begin{matrix} V \times 6 \\ + \end{matrix} \\
 o &\in \mathfrak{R}_+ \\
 \nu_t &\in \mathfrak{R}_+^6 \\
 \alpha_t &\in \mathfrak{R}_+^6
 \end{aligned} \tag{12}$$

## 3.4 Modell med optimert standard

Modellen med optimert standard er i hovedsak lik modellen fra kapittel 3.3, men med to unntak:

1. Målfunksjonen til modellen utvides med de reisendes ventetidskostnader. Hensikten er å etablere et tilbud som gir den beste avveiningen mellom operatørenes og passasjerenes kostnader
2. Skrankene i likningene 4 og 5 – dvs. fergestandarden – tas ut av modellen

### 1. Passasjerenes ventetidskostnader

Vi følger Andersen og Tørset (2019) og beregner forventet ventetid per passasjer ved valg av  $y$  ferger og frekvensen  $f$  på tidspunkt  $t$  som

$$T_{yft}^W = 1.12 + 4.82NS + 0.29 \left( \frac{\bar{T}_t}{yf} \right) \tag{13}$$

hvor parameterverdien i regresjonslikningen er hentet fra Andersen og Tørset (2019).

Ventetidskostnadene framkommer ved å gange forventet ventetid per passasjer med antall passasjerer per planleggingsperiode og med tidsverdiene. Parameteren NS er en dummyvariabel som angir rutetype (1 = nasjonal rute; 0 ellers), som vi her antar å gjelde alle samband med antall PBE ÅDT større eller lik 2000.

Merk at uttrykket i [13] er ikke-lineært i  $yf$ . For å gjøre det lettere å implementere modellen benytter vi variabelen  $\delta_{yft}$  til å velge riktig ventetid. Vi kan da definere ventetidskostnadene som

$$1.5H \sum_{y \in Y} \sum_{f \in F} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} 1.4T_y^W (251A_t D_u + 114A_t D_h) \delta_{yft} \quad [14]$$

### 3.4.1 Utvidelse av målfunksjonen

Vi er nå i stand til å utvide målfunksjonen i likning 1 med passasjerenes tidskostnader. Dette gjøres ved å legge til likning 14 i 1. Samtidig må betingelsene for fergestandarden fjernes fra problemet.

## 4 Forslag til ny inntektsmodell

Dagens inntektsmodell benytter antall kjøretøy i ulike takstgrupper som grunnlag til å beregne inntekter per samband. Antall kjøretøy per kategori multipliseres med tilhørende sats i riksregulativet for fergetakster og en gjennomsnittlig rabattandel per kategori for å beregne inntektsgrunnlaget.

I revideringen av inntektsmodellen foreslår vi en forenkling av KDDs etablerte metodikk, ved å anvende regresjonsanalyse til å estimere inntektene. Dette gjør oss i stand til å på en enkel måte predicere forventede billettinntekter basert på landsgjennomsnittet av fylkenes takstregulativer. Dette sikrer at fylkene behandles likt i beregningen.

En fordel med metodikken som foreslås i dette kapitlet er at den vil gjøre det enklere for KDD å oppdatere analysene jevnlig. Dette gjelder også for regresjonsanalysen, som vil kunne oppdateres jevnlig gjennom å hente inn data fra Fergedatabanken. Regresjonsanalysen fanger opp gjennomsnittlige rabattandeler gjennom å estimere forventede inntekter for sambandene og fylkene under ett, og det kreves ikke en omfattende informasjonsinnhenting om hvilke sonestrukturer og rabattandeler de enkelte sambandene benytter.

En viktig forskjell fra dagens modell er at den nye modellen baserer seg på data fra samband som har innført AutoPASS-regulativet for fergetakster. Tidligere har KDD basert seg på Riksfergeregulativet til estimering av inntekter. Siden majoriteten av sambandene nå har gått over til AutoPASS-regulativet har KDD bedt om at den nye modellen skal legge dette regulativet til grunn i kostnadsberegningen.

I det følgende beskriver vi datagrunnlaget og den statistiske analysen som ligger til grunn for den foreslåtte inntektsmodellen. Justeringer av inntektsberegningene som følge av reduserte fergetakster/gratis ferge diskuteres avslutningsvis.

### 4.1 Datagrunnlag og databehandling

Vår analyse benytter et regneark fra KDD som er samlet inn i forbindelse med beregning av fergekriteriet for 2022<sup>3</sup>. Dette gir en oversikt over alle samband som inngår i inntektssystemet og inneholder variabler som beskriver sambandene, som bl.a. normert rundturlengde per samband. Variabler fra dette datasettet inngår i det følgende som uavhengige variabler i regresjonsanalysene.

Informasjon om billettinntekter og trafikkvolumer (PBE) i fergesamband som har innført AutoPASS-regulativet er hentet fra Fergedatabanken. Informasjonen omfatter totalt antall PBE, PBE for tunge kjøretøy (dvs. summen av kjøretøy i andre takstklasser enn AP1) og PBE for elbiler.

---

<sup>3</sup> Departementets regneark er kalt «Ferjesamband i kriteriedata 2022 - etter kontroll». Grunnlagstallene som brukes til å beregne fergekriteriet publiseres hvert år på KDDs hjemmesider for kvalitetskontroll (se [www.regjeringen.no/id547025/](http://www.regjeringen.no/id547025/)). Dataene brukt i disse analysene er basert på datasettet etter kvalitetskontrollen hos fylkeskommunene.

Det har i den siste tiden vært strukturelle endringer i nivået på fergesatser som et resultat av Myndighetenes arbeid med å gjøre transport med ferge billigere for brukerne. Takstene ble redusert fra 1. juli 2021 og igjen fra 1. januar 2022. I samråd med KDD har vi valgt ut perioden januar til juni 2022 som datagrunnlag. I denne perioden har takstene vært forholdsvis uendret, og perioden er i mindre grad påvirket av sesongvariasjon.

## 4.2 Modellspesifikasjon

AutoPASS-regulativet legger til grunn en soneinndeling hvor lengden på fergereisen (målt i kilometer) er bestemmende for prisen på reisen. Følgelig legger vi til grunn at inntekt per PBE øker med rundturlengden. Takstene varierer også etter type kjøretøy, og vi vurderer derfor også andelen tunge kjøretøy og andelen nullutslippsbiler per samband som forklaringsvariabler i modellene.

En annen faktor som kan være bestemmende for kostnadene er antall kaier som anløpes. Dette skyldes at rundturlengden som benyttes i inntektssystemet (og som derfor ligger til grunn for våre inntektsberegninger) er et vektet gjennomsnitt av distanser per kaipar. Dette kan skape utfordringer for analysen, siden deler av trafikken bare reiser på deler av sambandet og ikke nødvendigvis hele rundturlengden i flerkantsamband. For å ta hensyn til dette bruker vi også maksimalt antall kaier per samband som en potensiell forklaringsvariabel. Denne variabelen inngår i datagrunnlaget fra KDD.

Basert på den foregående diskusjonen benytter vi 6 ulike modellspesifikasjoner til å estimere inntekt per PBE:

(Basis)	$\text{Inntekt/PBE} = \beta_0 + \beta_1 \text{Rundturlengde} + \epsilon$
(Kvadratisk)	$\text{Inntekt/PBE} = \beta_0 + \beta_1 \text{Rundturlengde} + \beta_2 0.5 \text{Rundturlengde}^2 + \epsilon$
(Kaier)	$\text{Inntekt/PBE} = \beta_0 + \beta_1 \text{Rundturlengde} + \beta_k \text{Antall kaier} + \epsilon$
(Kaier+Tunge)	$\text{Inntekt/PBE} = \beta_0 + \beta_1 \text{Rundturlengde} + \beta_k \text{Antall kaier} + \beta_t \text{Tungbilandel} + \epsilon$
(Kaier+Elbil)	$\text{Inntekt/PBE} = \beta_0 + \beta_1 \text{Rundturlengde} + \beta_k \text{Antall kaier} + \beta_e \text{Elbilandel} + \epsilon$
(Kaier+Tunge+Elbil)	$\text{Inntekt/PBE} = \beta_0 + \beta_1 \text{Rundturlengde} + \beta_k \text{Antall kaier} + \beta_t \text{Tungbilandel} + \beta_e \text{Elbilandel} + \epsilon$

Dette er ulike spesifikasjoner av regresjonsmodeller for sammenhengen mellom inntekt per PBE og sambandets lengde. Vi vurderer også om en ikke-lineær sammenheng med rundturlengde er relevant (kvadratisk modell), om flerkantsamband er statistisk forskjellige mtp inntektsgrunnlag (Antall kaier) eller om trafikkgrunnlaget (Tungbilandel; Elbilandel) påvirker inntektene. I det følgende kapitlet gjennomgår vi resultatene fra disse analysene og velger ut en av modellene til bruk til estimering av inntekter til beregning av normerte fergekostnader i inntektssystemet.

## 4.3 Resultater

Tabell 4 gjengir resultatene fra estimeringen av alle modeller beskrevet i kapittel 4.2.

Tabell 4: Resultater av regresjonsanalysen

	Basis	Kvadratisk	Kaier	Kaier +Tunge	Kaier +Elbil	Kaier +Tunge +Elbil
Rundturlengde	1.321*** (0.077)	1.533*** (0.219)	1.498*** (0.090)	1.405*** (0.094)	1.435*** (0.087)	1.389*** (0.091)
Rundturlengde <sup>2</sup>		-0.005 (0.005)				
Antall kaier			-5.511*** (1.678)	-4.684*** (1.655)	-5.562*** (1.580)	-5.047*** (1.603)
Tungbilandel				24.003** (9.290)		14.676 (9.646)
Elbilandel					-85.651*** (25.186)	-70.605** (26.870)
Konstant	41.811*** (2.094)	39.717*** (2.919)	52.592*** (3.834)	42.846*** (5.289)	60.609*** (4.311)	53.242*** (6.460)
N	85	85	85	85	85	85
R <sup>2</sup>	0.781	0.784	0.807	0.821	0.831	0.836

Standardfeil i parenteser

\*  $p < 0.10$ , \*\*  $p < 0.05$ , \*\*\*  $p < 0.01$

R<sup>2</sup> er et mål på hvor godt den statistiske modellen beskriver variasjonen i dataene. Dette er et tall mellom 0 og 1, hvor 1 betyr at det er perfekt match mellom datagrunnlaget og regresjonsmodellen.

Alle inntektsmodellene presentert av Tabell 4 viser en høy R<sup>2</sup>. Dette tyder på at regresjonsanalyse er et egnet verktøy til å predikere billettinntektene. Basert på R<sup>2</sup> alene virker det som at kaier+tunge+elbil er den beste modellen. Samtidig er dette modellen med flest variabler, noe som i seg selv trekker i retning av en høy R<sup>2</sup>. Årsaken til det er at denne alltid vil øke jo flere variabler som legges til i modellen. Det er derfor nyttig å se på flere kriterier for utvelgelse av inntektsmodell.

Et annet aktuelt kriterium er parameterestimatenes statistiske signifikans. Denne beregnes ved t-testing, og estimatenes statistiske signifikans er angitt ved bruk av stjerner (\*) i Tabell 4. Fra tabellen framkommer det at rundturlengde<sup>2</sup> ikke er statistisk signifikant i den kvadratiske modellen, og at heller ikke tungbilandel er statistisk signifikant i modellen kaier+tunge+elbil. På bakgrunn av dette anbefaler vi å ikke benytte disse to modellene til predikering av inntekt.

#### 4.3.1 Sammenlikning av utvalgte modeller

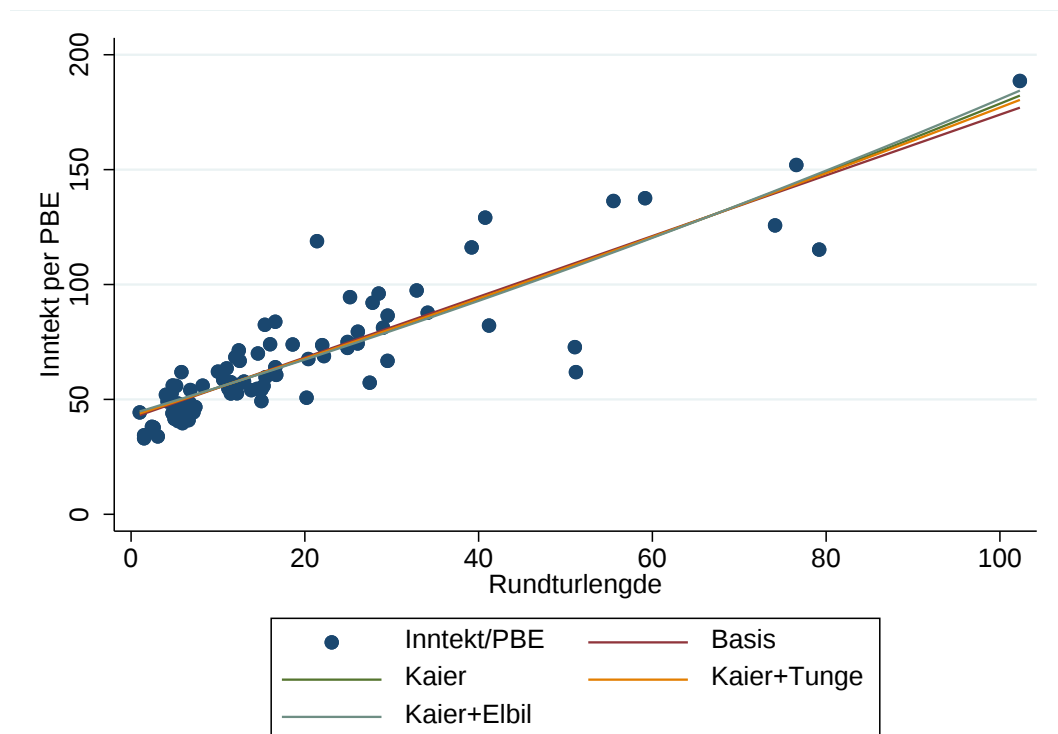
I lyset av den forutgående modellutvelgelsen framstår modellen kaier+elbil som den beste spesifikasjonen. Den har høy R<sup>2</sup> og alle parameterne som inngår i modellen er statistisk signifikante. Vi ønsker i dette kapitlet å vurdere inntektsprediksjonene fra denne modellen opp mot de 3 andre modellspesifikasjonene i Tabell 4.

Tabell 5 viser parvise korrelasjoner mellom predikerte inntekter per PBE per samband for de ulike modellene. Korrelasjonskoeffisienten er et tall mellom 0 og 1, og vil være 1 dersom det er perfekt samsvar mellom inntektsprediksjonen til to ulike inntektsmodeller. Tabell 5 viser dermed at predikerte inntekter er tilnærmet lik for alle vurderte modellspesifikasjoner siden korrelasjonskoeffisientene er 0.97 eller høyere. Alle korrelasjonene er statistisk signifikante.

Tabell 5: Korrelasjonsmatrise for predikerte inntekter per PBE per samband etter modellspesifikasjon. Signifikansnivå i parenteser.

	Basis	Kaier	Kaier+Tunge	Kaier+Elbil
Basis	1.000			
Kaier	0.984 (0.000)	1.000		
Kaier+Tunge	0.975 (0.000)	0.991 (0.000)	1.000	
Kaier+Elbil	0.970 (0.000)	0.985 (0.000)	0.985 (0.000)	1.000

Figur 1 viser faktiske og predikerte inntekter per PBE etter modellspesifikasjon og rundturlengde. Denne synliggjør at den viktigste forskjellen mellom modellene gjelder prediksjon av inntekter for samband med svært lange rundturer. Modellen Kaier+Elbil gir en inntektsprediksjon som ligger nærmest rapporterte inntekter per PBE med en rundturlengde på rundt 100 kilometer.



Figur 1: Faktiske og predikerte inntekter per PBE, etter modellspesifikasjon og rundturlengde



## 4.4 Anbefalinger

Basert på gjennomgangen av resultatene i kapittel 4.3 anbefaler vi bruk av modellen Kaier+Elbil til predikering av inntekter i inneværende perioder. Dersom det blir større strukturelle endringer i fergetakstene framover anbefaler vi å estimere modellen på nytt ved å hente inn data fra Fergedatabanken.

En ulempe med at den anbefalte modellen benytter antall kaier som en variabel er at det kan gi fylkene et insentiv til å øke antallet kaier i sambandene for å redusere inntektsgrunnlaget i beregningene av normerte fergekostnader. For å forhindre dette kan det settes et tak på antall kaier som det kompenseres for i beregningene. For eksempel kan 3 kaier settes som et tak, og antall kaier settes da lik 3 i beregningen av inntekter selv om sambandet i realiteten omfatter mer enn 3 kaier. Vi legger ikke et tak til grunn i de videre beregningene, men baserer inntektsberegningene på antall kaier rapportert per samband. Dette kan også rettferdiggjøres ut fra at investering i kaianlegg kan gi betydelige merutgifter for fylkene, noe som vil gjøre handlingsrommet for strategisk adferd mindre.

Fra 1. juli 2022 ble flere samband gratis. Dette gjelder samband med totalt passasjergrunnlag på under 100 000 per driftsår. I forslaget til statsbudsjett for 2023 har regjeringen foreslått å utvide ordningen med gratis ferge til også å omfatte øyer uten fastlandsforbindelse, med virkning fra 16. august 2023. Vi anbefaler at inntektene settes til 0 for samband som møter disse kriteriene i framtidige beregninger av normerte fergekostnader.

## 5 Parametere og implementering av modellrammeverk

Videre i rapporten ønsker vi å beregne kostnader og inntekter per fergesamband basert på metodikken som ble etablert i kapitlene 3 og 4 samt datagrunnlaget for KDDs siste beregninger av normerte fergeinntekter. Dette vil gjøre oss i stand til å sammenlikne resultatene fra beregningene med den nye modellen mot resultatene basert på KDDs etablerte metodikk for beregning av normerte fergekostnader. Dette kapitlet gir en oversikt over alle parameterne som benyttes i beregningene og deres kilder.

### 5.1 Parametere for elferger

Våre beregninger legger til grunn at alle samband betjenes med batterielektriske ferger. Denne avgrensingen gjør vi fordi våre beregninger viser at alle samband som inngår i inntektssystemet (slik de var definert i datagrunnlaget for siste års beregning av normerte fergekostnader) vil kunne betjenes med den største ferger og batteripakken lagt til grunn i våre beregninger så lenge det installeres ladeinfrastruktur på begge kaiene i pendelsambandet som modelleres. I realiteten kan andre energibærere som hydrogen vise som mer egnet teknologi for lange samband i framtiden. Vi velger i denne studien å se bort fra hydrogenløsninger, fordi:

- a) Teknologien er mindre moden og kostnadene og bruken er derfor mer usikker
- b) Å bruke ens teknologi i alle samband bidrar til lik behandling av sambandene, og gir dermed ikke noen insentiver til å tilpasse ruter for å oppnå ønsket valg av teknologistandard i beregningene av normerte fergekostnader
- c) Batterielektrisk drift er allerede innført i et stort antall samband

Tabell 6 beskriver fergetypene som kostnadsmodellen fra kapittel 3 kan velge blant. Disse er beskrevet med hensyn til flere parametere (attributter) som passasjerkapasitet, kapital-kostnader, energibruk og bemanning. Merk spesielt at kapitalkostnader (X) og bemanning (L) varierer etter type fartsområde (kalt FO i tabellen).

I alt er det 16 ulike fergetyper. De viktigste forskjellene mellom fergerne er deres personbilkapasitet (P; som varierer fra hhv 43 til 204 PBE) og batterikapasitet (C; som definerer et stort og et lite batteri per passasjerkapasitetskategori).

Revidert modell til beregning av fergekriteriet i inntektssystemet for fylkeskommunene

Tabell 6: Parametere for elferger

ID	PBE kap.	Batteri (kWh)	Max lading (kW)	Fergekostnad			Bemanning				Forbruk (kWh/km)	Fart (knop)	Tidsbruk last/loss (timer)	
				Batteri-kostnad	Totkost Fo1,2	Totkost FoC	Totkost FoD	Senior Fo1,2	Junior Fo 1,2	Senior FoC,D				Junior FoC,D
v1	43	1500	9 000	11	72	76	109	2	1	2	1	33	14.1	0.100
v2	59	2000	12 000	15	98	104	149	2	1	2	1	45	15.3	0.167
v3	77	2500	15 000	18	128	134	193	2	1	2	1	56	16.3	0.167
v4	97	3000	18 000	22	160	168	242	2	2	2	2	65	17.3	0.167
v5	120	3500	21 000	26	196	206	298	3	1	3	1	74	18.3	0.167
v6	146	4000	24 000	30	236	249	361	3	1	3	1	85	19.2	0.167
v7	173	4500	27 000	33	278	293	426	3	1	3	2	96	20.0	0.167
v8	204	5000	30 000	37	326	344	500	3	2	4	2	109	20.8	0.167
v9	43	3000	18 000	22	83	87	120	2	1	2	1	33	14.1	0.100
v10	59	4000	24 000	30	113	119	164	2	1	2	1	45	15.3	0.167
v11	77	5000	30 000	37	146	153	212	2	1	2	1	56	16.3	0.167
v12	97	6000	36 000	45	182	191	265	2	2	2	2	66	17.3	0.167
v13	120	7000	42 000	52	222	233	325	3	1	3	1	75	18.3	0.167
v14	146	8000	48 000	60	266	279	391	3	1	3	1	85	19.2	0.167
v15	173	9000	54 000	67	312	327	460	3	1	3	2	97	20.0	0.167
v16	204	10000	60 000	75	363	381	538	3	2	4	2	109	20.8	0.167

Forklaring: FO er fartsområde. Kategoriene er FO 1,2; FO C; og FO D.

### 5.1.1 Datakilder og databearbeiding

Parameterne for ferger tar utgangspunkt i fartøyslengder på 60 til 130 meter. Tilhørende verdier for lettskipsvekt og dødvekt per ferge beregnes på bakgrunn av en regresjonsanalyse på et sett av utvalgte eksisterende bilferger. Hver av fergetypene i beregningsmodellen tilegnes en maksimal seilingshastighet basert på en øvre grense for deplasementsfartøy. Denne farten vil variere med lengde da maksimal hastighet er en funksjon av skrogets skala. En motstandsmodell (Holtrop, 1984; Holtrop og Mennen, 1978;1982) brukes deretter til å beregne energiforbruk på bakgrunn av gjennomsnittlig seilingshastighet og vekt. Det legges til grunn en batterivekt på 0.009 metriske tonn per kWh, som legges til i lettskipsvekten.

Nypris for fergeren beregnes på bakgrunn av en regresjonsanalyse av nypriser basert på Møreforsknings fergemodell, som tidligere er dokumentert i tabell 2 og tabell 3. Det legges til grunn en generell prisstigning på 26 prosent mellom 2013 (basisåret for Møreforskningsmodell) og 2021 i henhold til SSBs statistikk. Batteriprisen er en del av den totale nyprisen for elferger, og antas å være 7500 kroner per kWh.

Vår erfaring er at forskjellen i pris mellom batteri- og dieseldrift først og fremst skyldes kostnader knyttet til batteriet. Vi ser ikke at kravene til fartøyene med tanke på dimensjonering og sikkerhet har endret seg betydelig siden 2013. I den grad prisveksten i fergeanbudene har vært høyere enn vanlig prisvekst må dette tilskrives andre forhold, som f.eks. at utstyret om bord er blitt mer avansert eller markedsforhold. Det kan også være geografiske variasjoner i kostnadsutviklingen. Slike kostnadsendringer vurderer vi ikke å være av relevans for beregningen av normerte operatørkostnader.

Bemanningen er satt lik minste mulige sikkerhetsbemanning (minimum safety manning). Denne er predikert på bakgrunn av et datauttrekk av bemanningssertifikater for eksisterende ferger fra Sjøfartsdirektoratet. I likhet med Tveter mfl. (2020) skiller vi mellom kategoriene over- og understilling siden fordelingen av stillingskategoriene og dermed lønnskostnadene kan variere mellom fergetypene.

Minste mulige bemanning per stillingskategori er beregnet ved hjelp av Data Envelopment Analysis (DEA). Dette er en metodikk basert på lineær programmering som brukes til å finne produksjonsfronten eller beste praksis i et datasett bestående av sammenliknbare enheter. En fordel med denne metoden kontra minste kvadraters metode er at den kan modellere begge stillingskategoriene simultant og ikke krever separate regresjonslikninger per stillingskategoriene. Samtidig identifiserer metoden minste mulige ressursbruk mens minste kvadrats metode identifiserer gjennomsnittlig ressursbruk.

Vi modellerer de to stillingskategoriene som innsatsfaktorer i DEA modellen, og estimerer den minste mulige bruken av disse gitt fergens lengde, bruttotonnasje og fartsområdesertifisering. Beregningene forutsetter en tett omhylling av dataene, også kjent som forutsetning om variabel skalaavkastning (VRS).

### 5.1.2 Annuitet for kapitalkostnader

Som i Møreforsknings modell beregner vi årlige kapitalkostnader ut fra antatt innkjøpspris for fergetypen ( $X_v$ ). Vi legger til grunn en uendret forutsetning om avskrivningstid på 30 år og en kalkulasjonsrente på 4 prosent.

En viktig forskjell fra dagens dieselferger er at batteriet ikke kan forventes å ha en levetid på 30 år, men må byttes ut etter 10-15 år. For å ta hensyn til dette legger vi inn kostnadene for en ekstra batteripakke i tillegg til totalkostnadene i beregningen av nyprisen per ferge. Kostnadene ved å fornye batteripakken per fergetype er spesifisert i tabell 6.

## 5.2 Enhetskostnader

Kostnadsmodellen inneholder en rekke enhetskostnader som vi går gjennom i dette kapitlet.

### 5.2.1 Energikostnader

Kostnaden for energi som batteriet ombord i fergen lades med er bygget opp av flere forskjellige komponenter:

1. Markedspris på strøm
2. Avgift på kraft (0,15 kroner per kWh, jf. Skatteetaten, 2019)
3. Anleggsbidrag
4. Nettleie

#### Markedspris

Det er vanskelig å si noe sikkert om kraftpriser generelt og spesielt på mellomlang sikt (måneder til år frem i tid) ettersom prisene varierer kraftig med vær og geopolitisk utvikling. Sommeren 2022 er et godt eksempel, hvor det i Sør-Norge (spotpris-område NO2) ble registrert en snittpris i juli på 2,58 kroner per kWh grunnet lite nedbør og veldig høye kraftpriser på kontinentet som følge av lite vind og mangel på billig russisk gass. Det motsatte inntraff i nord (spotpris-område NO4) hvor mye regn og begrenset eksportkapasitet gav en gjennomsnittlig pris på 0,019 kroner per kWh.

Utviklingen i kraftpris på enda litt lengre sikt er beheftete med andre typer usikkerheter, f.eks. utviklingstakt for nye teknologier og politikk (jf. energieffektivitetstiltak, CO<sub>2</sub>-priser, satsning på ny energiproduksjon mm.).

Det er ikke første gangen Europa har opplevd en energikrise og det finnes flere muligheter til å komme seg ut av den. For eksempel finnes det muligheter for å bygge mer fornybar kraftproduksjon og kjernekraft, bruke nye handelsmuligheter av fossile (t.eks. LNG) og fornybare (t.eks. hydrogen) energibærere, samt forbedret energieffektivitet. Med tanke på disse mulighetene kan man vurdere de høye prisene på kontinentet i dag som kortsiktige.

På bakgrunn av denne avveiningen legger vi til grunn en kraftpris basert på estimert høyt prisscenario i 2030 fra NVE's sin Langsiktig kraftmarkedsanalyse (NVE 2021). Det vil si 0,66 kroner per kWh.

#### Anleggsbidrag

For å koble seg til nettet må hver enkelt ny forbruker betale anleggsbidrag til nettselskapet. Noen ganger kan anleggsbidraget utgjøre kun en del av kostnaden ved nettoppgraderingen ettersom nettet samtidig kan oppgraderes for eksisterende eller fremtidige kunder. Denne kostnaden varierer betydelig siden forutsetningen for å knytte en ny kunde til nettet er

svært lokasjonsavhengig. Viktige faktorer som påvirker denne kostnaden er avstand til nett, ledig kapasitet på både relevant spenningsnivå og høyere spenningsnivåer, samt kostnad for å forsterke nettet hvis det ikke finnes ledig kapasitet. Det er derfor vanskelig å gi et godt representativt kostnadstall for denne parameteren, men for å inkludere denne kostnaden har vi brukt en kostnad på 2,5 millioner kroner per MW (Menon og AFRY, 2020).

## Nettleie

En forbruker av kraft må betale nettavgifter for å bidra til vedlikehold av nettet samt å kompensere for tap ved overføring av energi. Denne kostnaden er typisk fordelt på tre forskjellige ledd; fastledd, energiledd og effektledd.

Vi har i denne studien sammenstilt gjennomsnittstall for de tre leddene for fem større nettselskaper som har kystlinje (Lyse nett, BKK nett, Linja i Florø, Arva, Linea i Mo i Rana). Avgiftene gjelder tilkobling til høyspenningsnettet (>1000V AC) for effekter rundt 5 MW. Resultatet fra denne analysen benyttes til å anslå kostnader til nettleie.

Fastleddet utgjør en mindre del av kostnaden og er sett bort fra i denne analysen. Energi-leddet ligger på 0,097 kroner per kWh, mens effektleddet ligger på 456 kroner per kW for et år med jevn forbruk. Dette er en annuitetskostand beregnet med 4% diskonteringsrente og 30 års levetid.

## Sammenstilling av kostnadstallene

Kraftprisen finner vi ved å summere markedspris på kraftproduksjon, statens avgift på kraft, og pris på nettavgift;  $0,66+0,15+0,097=0,91$  kroner per kWh.

I tillegg kommer anleggsbidraget Anleggsbidrag og effektavgift er viktige kostnadsdrivere for installasjon og bruk av lader. Men disse kostnadskomponentene kan reduseres ved bruk av batteri i nettet, spesielt når laderen brukes sjelden. Hensikten er å lade batteribanken i perioder hvor det ikke er ferger til kai, for så å tømme batteribanken når det er ferger ved kai. På denne måten reduseres behovet for effekt fra strømmettet.

Tabell 7: Energikostnader per kWh etter anløp per dag og ladetid i minutter per anløp med bruk av batteri i nettet

		Ladetid (min)			
		5	10	15	20
Anløp per dag	10	1,34	1,33	1,31	1,30
	20	1,33	1,30	1,27	1,23
	30	1,31	1,27	1,22	1,17
	40	1,30	1,23	1,17	1,11
	50	1,28	1,20	1,13	1,05



Tabell 8: Energikostnader per kWh etter anløp per dag og ladetid i minutter per anløp uten bruk av batteri i nettet

		Ladetid (min)			
		5	10	15	20
Anløp per dag	10	2,88	1,89	1,57	1,40
	20	1,89	1,40	1,24	1,16
	30	1,57	1,24	1,13	1,07
	40	1,40	1,16	1,07	1,03
	50	1,30	1,11	1,04	1,01

Tabell 7 beskriver energikostnader per kWh med batterier installert i nettet, mens tabell 8 beskriver energikostnadene uten installering av lader. I tabellene er strømpris, anleggsbidrag, effektledd fra nettleien og et batteri er inkludert i kostnadskalkylen. Investeringskostnadene for anleggsbidrag og batteri er beregnet til en annuitetskostand med 4% diskonteringsrente. Anleggsbidrag antas å ha 30 års levetid, mens batteriet har en investeringskostnad på 4000 kroner per kWh og 8000 sykler med en levetid på 10 år (Cole mfl., 2021). Det vil naturligvis være variasjoner i behovet for økt effekt og anleggsbidrag mellom samband, men vi søker her å legge inn en generell sats som også ivaretar nettutvidelser.

Dersom kostnadsmodellen skal velge strømpris basert på antall anløp, etter ladetid og for valget mellom å ha eller å ikke ha et batteri i nettet vil det komplisere analysene ytterligere. Vi velger derfor en enklere tilnærming.

En første forenkling gjøres med tanke på valg av batteri eller ikke. En sammenstilling av tabell 7 og tabell 8 viser at energikostnadene uten batteri blir lavere enn tilfellet med batteri når antall rundturer per dag er høyt og ladetiden er lang, men at energikostnaden kan bli svært høy dersom man ikke har batteri og antall anløp er få og med kort liggetid. For å finne den kostnadsminimerende løsningen mtp valg av batteri eller ikke slår vi sammen de to tabellene ved å kun beholde den laveste energiprisen per element i matrisen.

Tabell 9: Lavest mulig energikostnader per kWh etter anløp per dag og ladetid i minutter mtp valg av batteri i strømm nettet

		Ladetid (min)			
		5	10	15	20
Anløp per dag	10	1,34	1,33	1,31	1,30
	20	1,33	1,30	1,24	1,16
	30	1,31	1,24	1,13	1,07
	40	1,30	1,16	1,07	1,03
	50	1,28	1,11	1,04	1,01

For å forenkle kostnadsberegningene ytterligere benytter vi gjennomsnittet av ladetidskategoriene i tabell 9 som energipris per kWh, angitt etter sambandets fergestandard. Kostnadene per kWh brukt i modellberegningene er gitt i tabell 10.

Tabell 10: Enerkipris (kr/kWh) etter normert fergestandard

Anløp per dag	Kroner/kWh
10	1,32
20	1,26
30	1,19
40	1,14
50	1,11

Vi bemerker at beregningene som presenteres videre i rapporten benytter tall fra Tabell 10, og skiller følgelig ikke mellom ulike prisområder. Selv om dette fremstår som relevant i dag har det historisk ikke vært store skiller mellom prisområder for strøm. Vi anbefaler at KDD vurderer behovet for regional differensiering av strømprisen i sitt videre arbeid med modellen.

### 5.2.2 Kostnader ved ladeinfrastruktur

Installasjonskostnad for lader er også avhengig av lokasjon og prosjekt. Estimer fra erfarne leverandører av slike anlegg angir en kostnad på 2,5 til 12 millioner kroner per MW for installasjon av kraftelektronikk, men da ekskludert ladetårnet. Små anlegg har en høyere installasjonskostnad per MW (Danebergs mfl., 2022). I denne studien antar vi en kostnad for lader på 3,5 millioner kroner per MW.

I tillegg kommer kostnad for selve ladetårnet. Et ladetårn med manuell tilkobling til fergen koster omtrent 0,7 millioner kroner per MW ved optimalt utnyttet kapasitet. For å effektivt utnytte tid i havn til ladning trengs automatisk til- og frakobling, noe som fordyrer installasjonen betydelig. I tillegg vil ladetårnet sannsynligvis være noe overdimensjonert i forhold til faktisk ladehastighet. Derfor antar vi kostnaden for automatisert ladetårn å være 1,4 millioner kroner per MW.

Til sist kommer kostnader for å tilpasse kai og eventuelt oppføre bygning for ladere. Dette er tatt med i beregningen med en antatt sum på 0,5 millioner NOK per MW. Ut over dette er ikke videre tilpasning av kai og kaianlegg, f.eks. som følge av tilrettelegging for større fartøy, medregnet.

Total investeringskostnad for lader er sum av selve ladere, ladetårn og kostnad for tilpassing av infrastruktur og er antatt i modellen å være 5,4 millioner NOK per MW. Med 4% diskonteringsrente og levetid på 20 år blir det en annuitetskostnad på 390 000 kroner per år og MW.

### 5.2.3 Mannskapskostnader

Som i Tvetter mfl. (2020) beregnes lønnskostnader per dag (dvs. skift) og stillingskategori fra Utdanning.no. Vi benytter gjennomsnittlig medianlønn for dekksoffiserer og skipsmaskinister til å regne ut overstillingssatsen mens medianlønn for dekk- og maskinmannskap benyttes til å regne sats for understilling. Ut fra en antakelse om 233 virkedager blir lønnsats per overstilling 4136 kr/dag og understilling 3115 kr/dag. Begge satsene er oppgitt i 2021-kroner.

Vi legger til grunn et helgedagstillegg med en faktor på 1.1875 av lønnsatsen som i Tvetter mfl. (2020).

## 5.2.4 Tidsverdier

For personbiler legges det til grunn en tidsverdi for fergereiser per passasjer på 188 kr/time (2021-NOK) i henhold til Flügel mfl. (2020). Vi antar et personbilbelegg på 1.4 basert på fergestatistikk, og følger Wardman mfl. (2016) og antar at tidsverdien for venting skal være 1.5 ganger den normale ventetidskostnaden. Tidsverdien per PBE er da  $1.4 * 1.5 * 188 = 394$  kr/time.

Godstransport forventes å ha en høyere tidsverdi enn dette, men samtidig utgjør ett stort kjøretøy typisk mange PBE (fra 3 til 13 PBE) slik at tidsverdien per PBE blir lavere enn for en personbil. Vi legger til grunn en gjennomsnittlig tidsverdi på 460 kroner/time per tungt kjøretøy fra Grønland (2022) og en tidsverdi knyttet til godset på 223 kroner/time per tungt kjøretøy under forutsetning om frakt av 15 tonn gods. Den siste beregningen benytter gjennomsnittlige tidsverdier fra Halse mfl. (2019). Ved en gjennomsnittlig vekt på 7 PBE per tungt kjøretøy innebærer det at tidsverdien til en PBE-ekvivalent av tunge kjøretøy i snitt gir en tidsverdi for tunge kjøretøy på 97 kroner/PBE-time.

Basert på fergestatistikk anslår vi en gjennomsnittlig tungbilandel på 39 prosent. Når vi benytter denne til å vekte tidsverdiene til hhv. lette og tunge kjøretøy finner vi en gjennomsnittlig tidsverdi på 278 kroner/time som benyttes i beregningene.

## 5.3 Trafikkfordeling

Vi legger til grunn at etterpørselen på ukedager og helgedager beregnes på følgende måte:

$$D_U = \text{ÅDT PBE} / ((251/365) + 0.8 * (114/365))$$

$$D_W = 0.8 * D_U$$

Vi antar altså at trafikken i helgen er 80 prosent av trafikken i uken. Dette baserer seg på gjennomsnittlige tall for fergesektoren i Oslo Economics (2021). Vi har også benyttet denne publikasjonen til å lage trafikkfordelinger over døgnet.

Tabell 11: Trafikkfordelinger over døgnet og etter virke- og helgedag. Kilde: Oslo Economics, 2021.

	Adag	Akveld	Anatt
Tuke	0.53	0.32	0.15
Thelg	0.53	0.37	0.10

## 5.4 Andre driftskostnader

I likhet med den etablerte fergemodellen antar vi at andre driftskostnader beregnes ved en multiplikator på energikostnadene. Multiplikatoren er (1/0.45) i samband med en ferge, (1/0.6) i samband med to ferger og (1/0.7) i samband med tre eller flere ferger.

Siden elferger er mer drivstoffeffektive finner vi at energikostnadene tilnærmet halveres sammenliknet med beregninger med modellen KDD benytter i dag til å beregne normerte fergekostnader. Siden det virker urealistisk at andre driftskostnader faller tilsvarende velger vi å skalere multiplikatoren for andre driftskostnader med en generell korreksjon på (1/0.47) for å kompensere for forskjellen i energikostnadene mellom de to modellene. Dette gir en

multiplikator for beregning av andre driftskostnader pålydende 2,59 for en ferge, 1,41 for to ferger og 0,91 for tre eller flere ferger.

## 6 Beregning av kostnader, inntekter og kriterieverdier

Vi benytter 5 ulike spesifikasjoner av kostnadsmodellen beskrevet i kapittel 3 til å estimere årlige bruttokostnader per samband. Dette gjøres for å synliggjøre hvordan modellering av bibetingelser knyttet til fergenes kapasitet og fergestandarden påvirker resultatene. De 5 ulike modellspesifikasjonene er beskrevet nærmere i kryssløpstabell 12. De viktigste skillene går mellom bruken av KDDs fergestandard eller tidsverdi til å bestemme fergetilbudet og hvorvidt modellen pålegger betingelser for betjening av etterspørsel og kapasitetsutnyttelse; jf. kapittel 3.3.2.

Tabell 12: Definisjon av modellspesifikasjoner for kostnadsberegningen.

Navn på modellspesifikasjon	Fergestandard	Tidsverdi passasjerer	Etterspørselsbetingelser	35% kapasitetsutnyttelse i driftsdøgn	35% kapasitetsutnyttelse per planleggingsperiode
MFM	X			X	
Eksogen 1	X		X	X	
Eksogen 2	X				X
Eksogen 3	X				
Endogen		X	X		

Vi benytter GAMS til kostnadsberegningen og Stata til analyse av resultatene og beregning av inntekter i henhold til kapittel 4. GAMS-koden for estimering av bruttokostnader er lagt ved i Appendikset.

### 6.1 Kostnadsberegninger

Vi ønsker i det følgende å sammenlikne de ulike kostnadsberegningene definert av tabell 12, samt å sammenlikne de med KDDs egne beregninger av brutto driftskostnader per samband.

#### 6.1.1 Kostnadsberegninger med fast fergestandard

I dette kapitlet sammenlikner vi modellene MFM, Eksogen1, Eksogen2 og Eksogen 3. Disse beregningene legger fergestandarden fra tabell 1 til grunn. Vi vil vise at disse gir veldig like resultater, selv om kostnadsnivået generelt varierer noe mellom modellspesifikasjonene. Tabell 13 gir en overordnet beskrivelse av beregningene av bruttokostnader per samband mens tabell 14 viser korrelasjonsmatrisen for de ulike modellberegningene. Sistnevnte viser et tall mellom 0 og 1, hvor et tall lik 1 betyr at det er perfekt samsvar mellom kostnadsberegningene som sammenliknes.

Tabell 13: Oppsummerende statistikk om estimerte bruttokostnader (2021-mNOK) fra beregninger med fast fergestandard

	MFM	Eksogen 1	Eksogen2	Eksogen 3
Gjennomsnitt	29.739	26.767	29.762	31.267
Standardavvik	15.287	9.756	15.335	17.564
Minimum	14.368	14.368	14.368	14.368
Maksimum	104.306	61.197	104.306	117.828

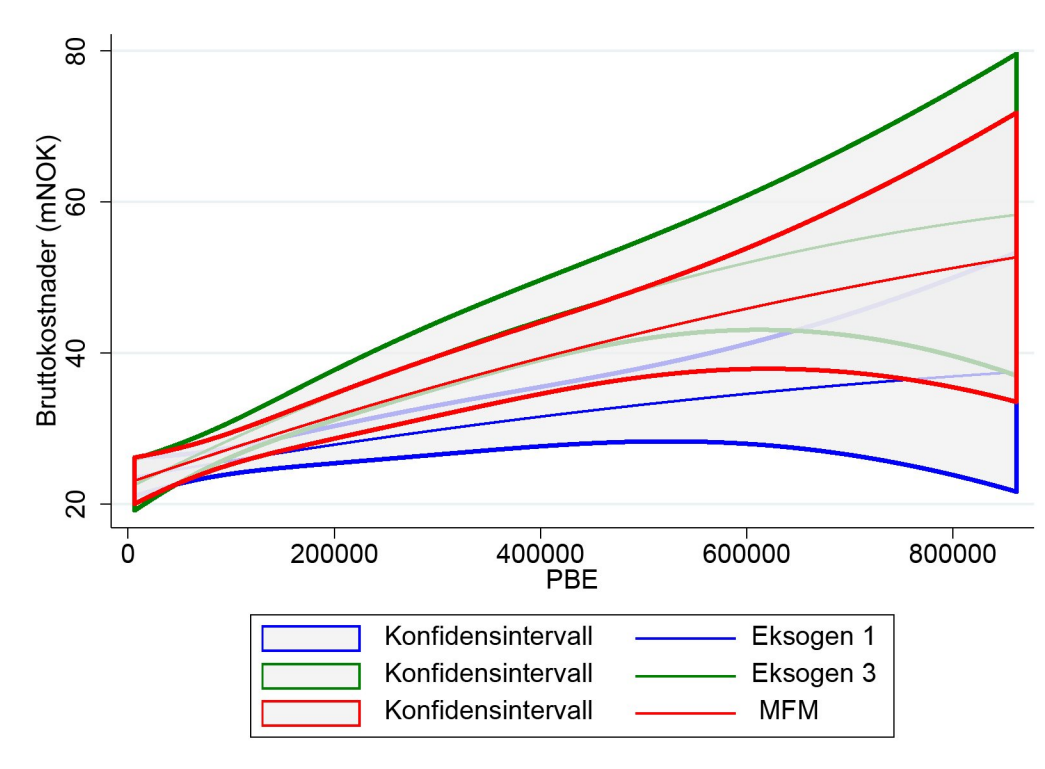
Tabell 14: Korrelasjonsmatrise for estimerte bruttokostnader fra beregninger med fast fergestandard

	MFM	Eksogen 1	Eksogen 2	Eksogen 3
MFM	1			
Eksogen 1	0.926	1		
Eksogen 2	1.000	0.927	1	
Eksogen 3	0.994	0.913	0.994	1

Tabellene viser at de ulike modellspesifikasjonene gir nokså like resultater. Spesielt framgår det at beregningene MFM og Eksogen 2 gir tilnærmet identiske resultater. Dette kan forstås som at forutsetningen om 35 prosents kapasitetsutnyttelse over døgnet er bestemmende for valg av type materiell samt antall ferger og frekvens, og at det derfor ikke er behov for ytterligere bibetingelser som krever at kapasiteten skal være tilstrekkelig til å dekke etterspørselen innen hver planleggingsperiode i kostnadsmodellen. På bakgrunn av dette gir vi ingen videre diskusjoner av resultater for Eksogen 2 i det følgende.

Figur 2 sammenlikner estimerte bruttokostnader per samband på bakgrunn av modellspesifikasjonene MFM, Eksogen 1 og Eksogen 3. For å gjøre sammenlikningene lesbare benytter vi en kvadratisk regresjonsmodell til å predikere gjennomsnittlige bruttokostnader etter antall PBE i sambandet og beregner 95% konfidensintervall for prediksjonene.





Figur 2: Sammenlikning av estimerte bruttokostnader (2021-mNOK) fra modeller med fast fergestandard ved bruk av kvadratisk prediksjon.

Figur 2 viser at enhetskostnadene er fallende i antall PBE, noe som indikerer stordriftsfordeler i ruteproduksjonen. Beregningen MFM fremstår som et medianalternativ for kostnadsberegningene med fast standard. Eksogen 1 gir lavere kostnader enn dette alternativet, mens eksogen 3 gir høyere kostnader. Årsaken til dette er at antakelsen om 35% kapasitetsutnyttelse er viktig for resultatene. Eksogen 1 pålegger ikke dette kravet, mens eksogen 3 pålegger dette kravet strengere enn dagens fergemodell (gjennom å kreve at 35% kapasitetsutnyttelse skal oppfylles innenfor hver av de 6 planleggingsperiodene som inngår i modellen).

Alle beregningene viser at konfidensintervallet (dvs. usikkerheten til beregningene) øker med antall PBE. Forklaringen på dette er at det er forholdsvis få samband med et høyt antall PBE i utvalget, mens det derimot er mange små samband tatt med i vurderingen.

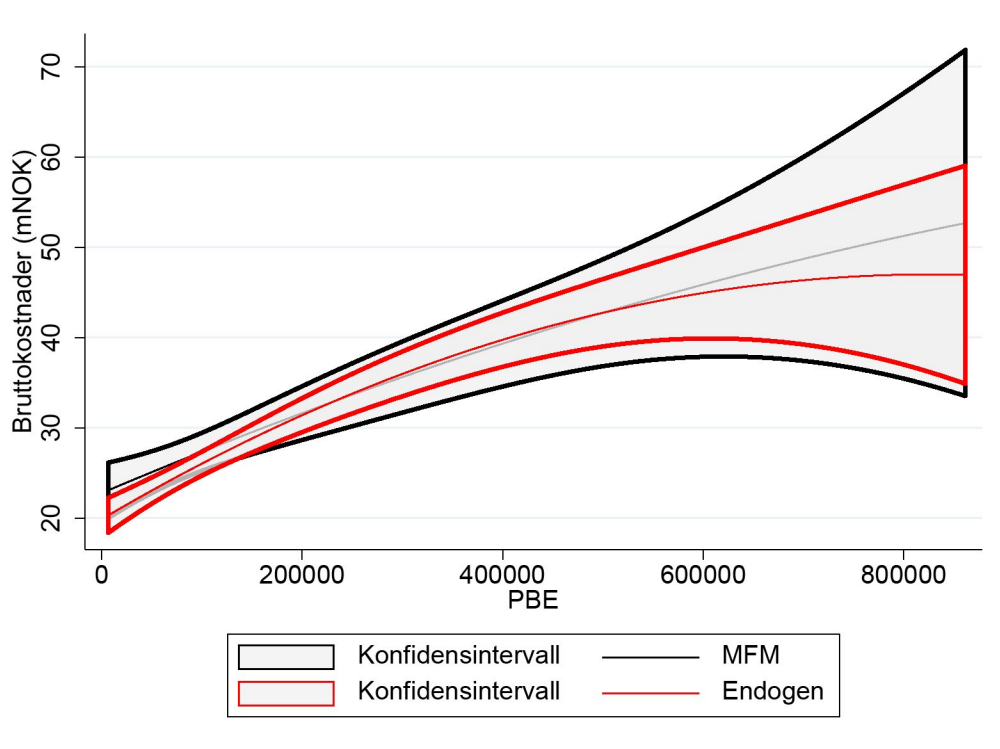
## Konklusjoner

Modellspesifikasjonen MFM ligger nært opp mot dagens fergemodell. Den fremstår også som et medianalternativ for beregningene med fast fergestandard. Vi ser det derfor som hensiktsmessig å basere oss på denne kostnadsmodellen i de videre sammenlikningene og beregningene.

### 6.1.2 Kostnadsberegninger med optimert fergestandard

I dette avsnittet ser vi på kostnadsberegningene når fergestandarden optimeres ved å avveie operatørens kostnader mot passasjerenes ventetidskostnader. Figur 3 sammenlikner predikerte gjennomsnittlige operatørkostnader og tilhørende standardavvik mellom modell

MFM (med fast fergestandard) og modellen Endogen (hvor optimering av fergestandarden inngår i kostnadsberegningen).



Figur 3: Sammenlikning av estimerte brutto operatørkostnader (2021-mNOK) med optimert og fast fergestandard.

Under våre forutsetninger om tidsverdien per PBE i kapittel 5.2.4 finner vi at optimert standard og dermed også gjennomsnittlige estimerte brutto operatørkostnader per samband er marginalt lavere for Endogen enn for MFM for samband med lave og høye verdier av PBE. En grov tolkning av dette er at dagens fergetilbud har en litt høyere standard enn hva som er samfunnsøkonomisk optimalt. Samtidig tar ikke våre beregninger hensyn til at etterspørselen kan endre seg dersom fergetilbudet endrer seg, noe som igjen vil være med på å påvirke resultatene.

En hovedhensikt med å vurdere modellen med optimert standard var å finne ut om elfergenes behov for økt tid i havn grunnet lading krever en reduksjon av den normerte fergestandarden. Selv om Figur 3 viser at modellen Endogen legger til grunn en liten reduksjon av dagens standard for noen av sambandene virker ikke dette i hovedsak å kunne tilskrives ladeproblematikken: Resultatene fra kapitlene 6.1.1 og 6.1.2 tyder på at alle samband er i stand til å møte den normerte fergestandarden som brukes i dagens ferge-modell, og vi vil i fortsettelsen vise at beregningene med fast standard er sammenliknbare med KDDs egne kostnadsberegninger for dieselferger. Hovedforklaringen på avviket mellom MFM og Endogen er dermed vurderingen av hva som er det samfunnsøkonomiske riktige nivået på fergetilbudet.

## Konklusjoner

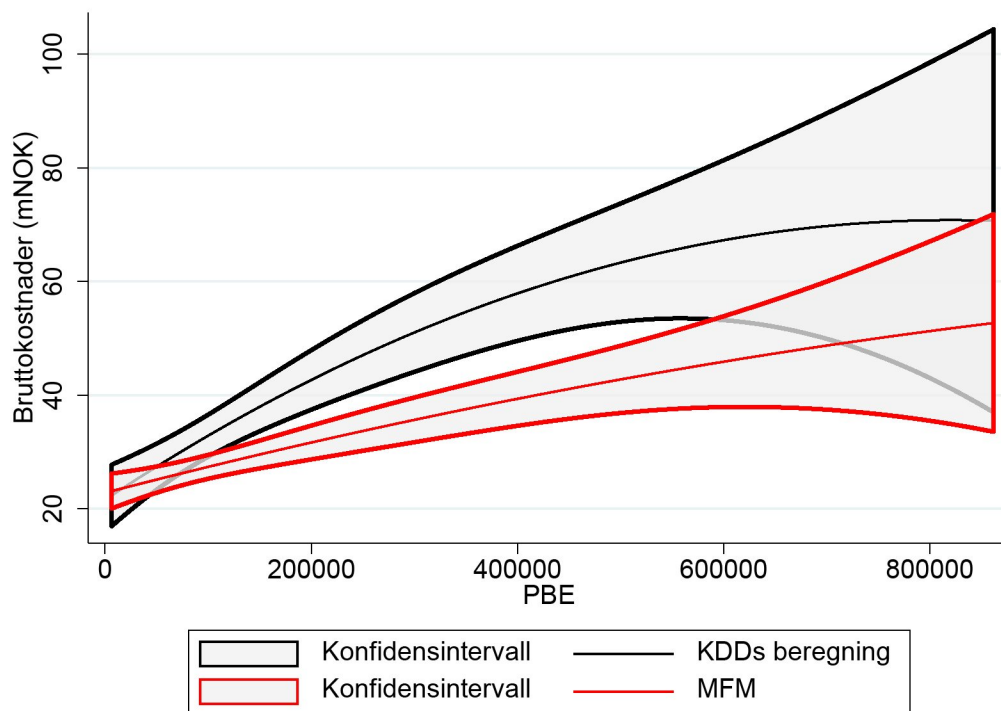
En hovedhensikt med å vurdere modellen med optimert standard var å finne ut om drift av nullutslippsferger krever en endring i fergestandarden. Våre resultater tyder ikke på at det er

store tekniske eller finansielle utfordringer knyttet til å opprettholde den faste fergestandarden i de normerte beregningene. I lyset av dette anbefaler vi å benytte modellen MFM som hovedalternativ til videre beregninger av fergekriteriet.

Samtidig bør det understrekes at dagens fergestandard bygger på en kartlegging av fylkenes subjektivt valgte servicenivåer, mens en avveining mellom operatør- og passasjerkostnader benytter samfunnsøkonomisk lønnsomhet som et objektivt kriterium til å bestemme sambandenes og fylkenes inntektsbehov. Dette gjør modellen relevant for inntektssystemet som er tuftet på objektive kriterier. Modellen Endogen muliggjør også å bestemme en individuell fergestandard per samband basert på trafikken i sambandet, mens den faste fergestandarden legger til grunn en felles standard for alle liknende samband. På denne måten kan Endogen komme nærmere en beskrivelse av det reelle inntektsbehovet per samband enn hva MFM gjør. I lyset av dette ser vi det som hensiktsmessig å også presentere en alternativberegning av kriteriet normerte fergekostnader basert på kostnadsmodellen Endogen.

### 6.1.3 Sammenlikning med KDDs beregninger

Som et ledd av valideringen av kostnadsmodellen ønsker vi å sammenlikne de nye beregningene dokumentert i kapitlene 6.1.1 og 6.1.2 med KDDs beregninger av normerte bruttokostnader basert på etablert metodikk for beregning av normerte fergekostnader. Vi tar derfor utgangspunkt i KDDs egne beregninger basert på sambandsdata for 2019, men prisjusterer beregningene med Statistisk Sentralbyrås kostnadsindeks for innenriks sjøfart, delindeks ferger. I perioden mellom 2013 (prisåret i KDDs beregninger) og 2021 viser denne indeksen en prisøkning på rundt 27 prosent. Vi oppjusterer følgelig KDDs beregninger med 27 prosent for å gjøre de sammenliknbare med de nye beregningene.

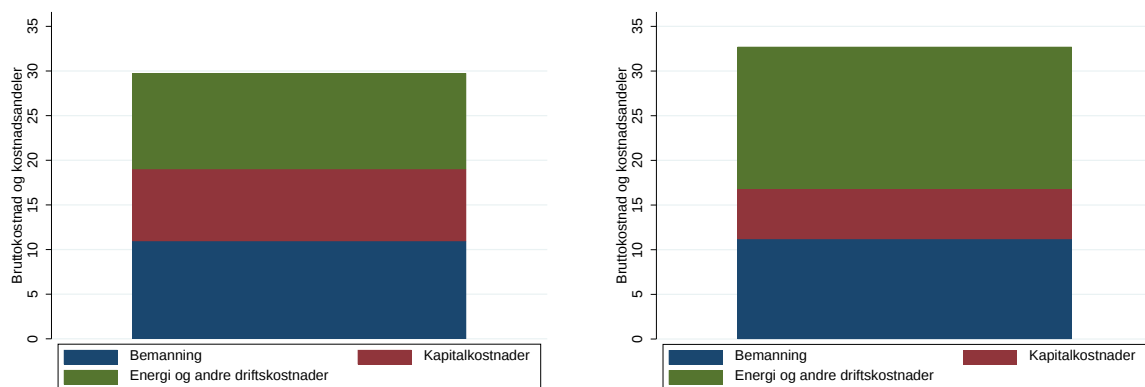


Figur 4: Sammenlikning av estimerte bruttokostnader (2021-mNOK) fra MFM og KDD sine beregninger.

Figur 4 sammenlikner gjennomsnittlige kostnader og tilhørende konfidensintervall mellom modellen MFM og KDDs egne beregninger. Figuren viser at de nye beregningene generelt rapporterer lavere bruttokostnader og er beheftet med noe mindre usikkerhet enn KDDs beregninger. Det er to nærliggende forklaringer på dette:

1. For det første benytter den nye kostnadsmodellen optimering, og kan derfor være i stand til å finne fram til mer kostnadseffektive løsninger for organisering av ferge-transporten enn dagens modell.
2. For det andre er elferger generelt mer energieffektive enn dieselferger. Dette trekker i retning av lavere driftskostnader, noe som videre vil føre til en reduksjon av sekkeposten «andre driftskostnader» siden disse antas å utgjøre en fast andel av energikostnadene. Se kapittel 3.3 for en nærmere beskrivelse av modelleringen av andre driftskostnader.

For å synliggjøre punkt 2 sammenlikner vi gjennomsnittlige kostnadsandeler for alle samband mellom MFM og KDDs beregninger.



(a) Modell MFM

(b) KDDs beregninger

Figur 5: Sammenlikning av bruttokostnader (2021-mNOK) og kostnadsandeler mellom MFM og KDDs beregninger

Figur 5 synliggjør sentrale forskjeller i estimerte bruttokostnader mellom MFM og KDDs egne beregninger. Høyden på stolpen viser gjennomsnittlige bruttokostnader i millioner 2021-NOK, mens de fargede feltene viser kostnadsandeler til hhv. mannskaps-, kapital- og energikostnader. Den sistnevnte rommer også posten andre driftskostnader.

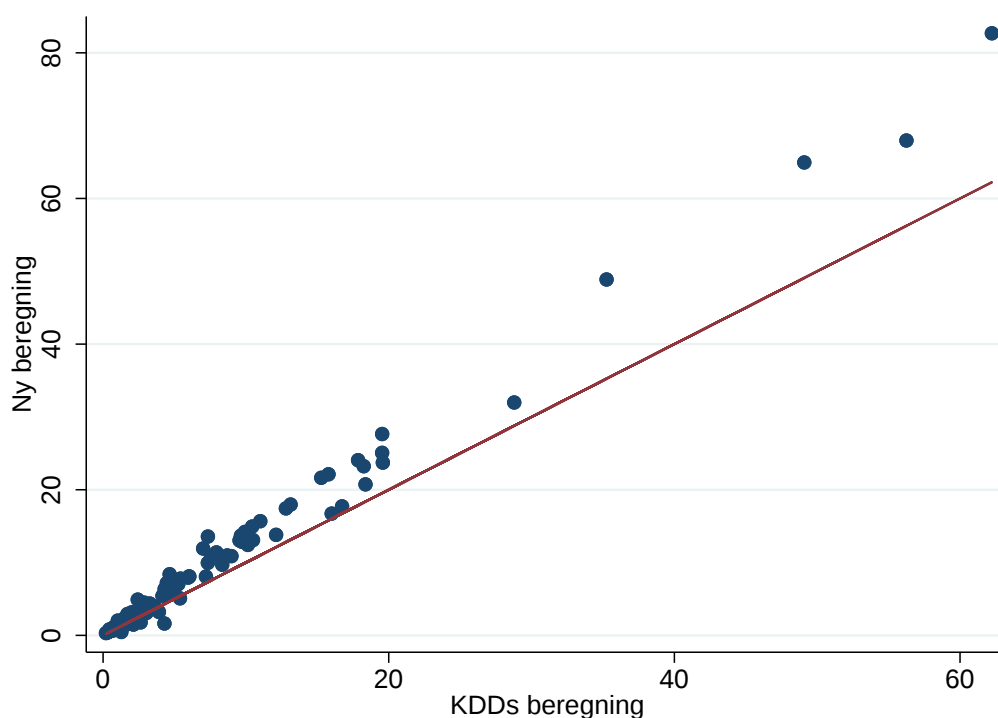
Det fremgår av figuren at bemanningskostnadene er sammenliknbare mellom beregningene. Derimot er det ulikheter når det gjelder de øvrige kostnadspostene.

1. MFM viser høyere kapitalkostnader enn KDDs beregninger. Dette skyldes økte investeringer som følge av overgangen til nullutslipp, både i form av reinvestering av batterier i løpet av fergens levetid og knyttet til investeringer av ladeinfrastruktur på land.
2. KDDs beregninger viser høyere energikostnader siden disse er basert på energiforbruket til dieselferger. Dette skyldes både at elferger er mer energieffektive enn konvensjonelle ferger og delvis også at andre driftskostnader regnes som en andel av energikostnadene. Som diskutert i kapittel 5.4 har vi justert beregningen av andre

driftskostnader i forhold til KDDs modell for å (i gjennomsnitt) kompensere for forskjellene i drivstoffkostnader mellom diesel- og elferger.

## 6.2 Inntektsberegninger

Inntektene beregnes basert på regresjonsanalysen dokumentert i kapittel 4. Figur 6 sammenlikner den nye inntektsberegningen med KDD sin egen beregning av inntekter basert på etablert metodikk for beregning av kriteriet normerte fergekostnader.



Figur 6: Sammenlikning av ny inntektsberegning og KDDs egen inntektsberegning. 45-graderslinjen er vist i rødt.

Figuren viser at KDD sine inntektsberegninger tenderer mot underestimering av billettinntekter under AutoPASS-direktivet. Det kan være flere grunner til dette funnet. En forklaring er at KDD bruker takstene fra 2015 i sine beregninger, og det kan hende at de er blitt prisjustert med mer enn vanlig prisstigning i perioden. Det har også tidligere vært spekulert i at overgangen fra Riks- til AutoPASS-regulativet gir økte inntekter for fylkeskommunene. For hele fergesektoren skal overgangen i utgangspunktet være provenynøytral, men siden det er ulik sammensetning av kjøretøy hos fylkeskommuner og stat er det mulig at overgangen reelt sett gir noe høyere inntekter til fylkeskommunene. KDD tar heller ikke med elbiler i sine inntektsberegninger.

Det bør bemerkes at inntektsberegningene i dette kapitlet ikke gjør fratrukk av inntekter for fergesamband med under 100 000 passasjerer årlig. En fordel med dette er sammenliknbarhet med KDDs egne beregninger, som legger til grunn fratrukk av billettinntekter for alle

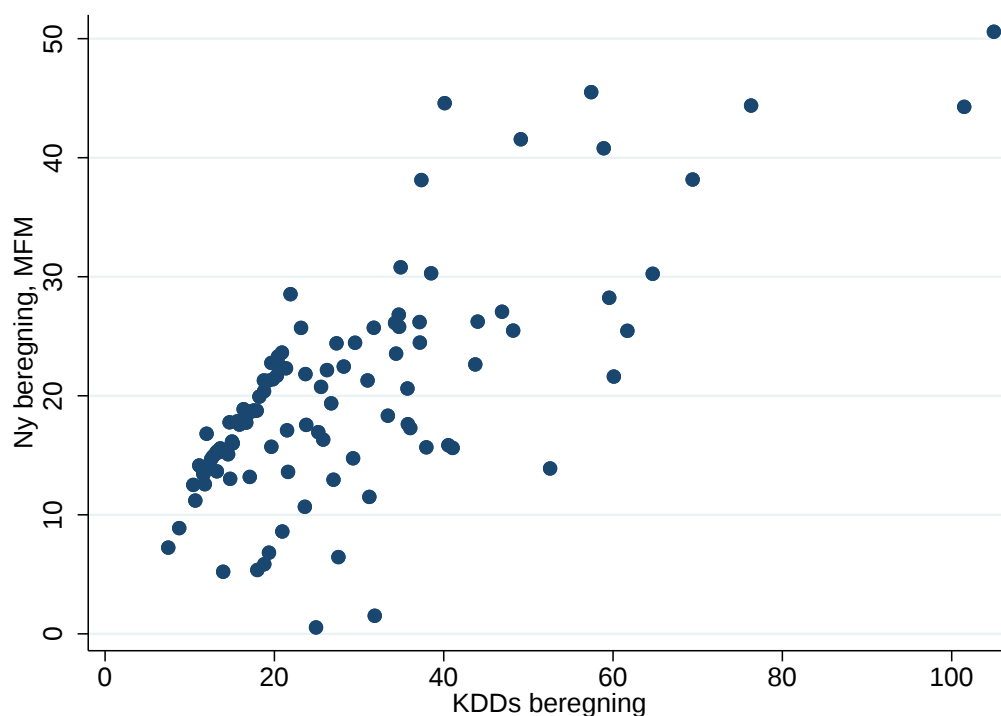


samband. I nye beregninger av kriteriet normerte fergekostnader anbefaler vi derimot et fratrekk av inntekter for samband som møter myndighetenes kriterier for gratis fergetransport.

### 6.3 Nettokostnader

Etter å ha beregnet både kostnader og inntekter trekkes inntektene fra bruttokostnadene for å beregne nettokostnader ved å tilby fergetransport. Figur 7 sammenlikner våre nye beregninger ved MFM-spesifikasjonen mot KDDs egne beregninger.

Siden de nye kostnadsberegningene generelt gir lavere bruttokostnader enn KDDs beregninger blir estimerte nettokostnader fra MFM generelt lavere enn for KDDs beregninger. Samtidig viser figur 7 at det er god match mellom modellene for flere samband, men at det også finnes samband der KDDs metodikk foreslår betraktelig høyere nettokostnader enn den nye metodikken etablert i denne studien. Korrelasjonskoeffisientene mellom de to beregningene av nettokostnader er 0.72.



Figur 7: Sammenlikning av estimerte nettokostnader mellom MFM-modellen og KDDs egne beregninger

### 6.4 Kriterieberegning

Den overordnede hensikten med analysen er å vise hvordan kostnadene ved fergetransport varierer mellom fylkene etter innføringen av nullutslippskrav og AutoPASS-regulativet. Dette gjøres ved å summere opp nettokostnadene for alle de 107 sambandene som inngår i beregningen av fergekriteriet for deretter å beregne det enkelte fylkes andel av disse



kostnadene. Resultatene for denne beregningen for MFM-spesifikasjonen og KDDs egne beregninger er vist av tabell 15. Tabellen omfatter også en alternativ beregning av kriteriet normerte fergekostnader ved bruk av modellen Endogen.

Tabell 15: Fylkenes andeler av totale nettokostnader for alle samband som inngår i beregningen av kriteriet normerte fergekostnader

	KDDs beregning	MFM	Endogen
Agder	0.006	0.011	0.013
Innlandet	0.004	0.006	0.008
Møre og Romsdal	0.166	0.143	0.143
Nordland	0.258	0.242	0.239
Rogaland	0.070	0.082	0.073
Troms og Finnmark	0.161	0.161	0.163
Trøndelag	0.080	0.090	0.087
Vestfold og Telemark	0.011	0.017	0.018
Vestland	0.242	0.244	0.251
Viken	0.002	0.003	0.004

Tabell 15 viser at omleggingen av kostnadsmodellen til å ta hensyn til nullutslippsferger og omleggingen av inntektsmodellen til å ta hensyn til innføringen av AutoPASS-regulativet i praksis har begrenset betydning for beregningen av kriteriet normerte fergekostnader. De mest merkbare forskjellene er at det relative innteksbehovet til Møre og Romsdal og Nordland vurderes å være noe lavere i beregningene med nullutslippsferger, sammenliknet med beregningene basert på etablert metodikk for beregning av kriteriet normerte fergekostnader.

## 6.5 Sensitivitetstesting

Det er flere usikre parametere som inngår i beregningene av kostnader ved elferger, bl.a. knyttet til teknologi- og prisutviklingen framover. En parameter som utmerker seg er prisen på strøm, som har vært spesielt høy og volatil i inneværende periode. Vi ønsker i dette delkapitlet å rette søkelyset på hvordan en endring i strømprisen brukt i beregningene kan påvirke resultatene. Vi estimerer derfor to alternativscenarier hvor

- a) Strømprisen faller med en krone i forhold til parameterverdiene for strøm fra kapittel 5.2.1 (lavt scenario)
- b) Strømprisen øker med to kroner i forhold til parameterverdiene for strøm fra kapittel 5.2.1 (høyt scenario)

Tabell 16 sammenlikner beregninger av fylkenes andeler av totale nettokostnader ved modellene MFM og Endogen i scenariene med høy og lav strømpris opp mot KDDs egne beregninger. Denne viser at fordelingen mellom fylkene påvirkes i noen grad av hvilken strømpris som brukes i beregningen. Spesielt gjelder dette for Møre og Romsdal og Troms og Finnmark. Dette tyder også på at fordelingen vil ytterligere påvirkes av en eventuell innføring av prisområder for strøm i modellen.

Tabell 16: Beregning av fylkenes andeler av totale nettokostnader i scenarier med høy og lav strømpris

	Lav energipris			Høy energipris	
	KDD	MFM	Endogen	MFM	Endogen
Agder	0.006	0.016	0.017	0.008	0.011
Innlandet	0.004	0.011	0.011	0.004	0.006
Møre og Romsdal	0.166	0.073	0.089	0.186	0.180
Nordland	0.258	0.260	0.242	0.226	0.230
Rogaland	0.070	0.097	0.082	0.076	0.069
Troms og Finnmark	0.161	0.192	0.193	0.144	0.153
Trøndelag	0.080	0.079	0.088	0.097	0.089
Vestfold og Telemark	0.011	0.023	0.024	0.013	0.015
Vestland	0.242	0.243	0.249	0.244	0.242
Viken	0.002	0.005	0.005	0.002	0.004

## 7 Oppsummering og konklusjon

Denne rapporten har diskutert ny metodikk til å beregne kriteriet normerte fergekostnader i inntektssystemet til fylkeskommunene. Hensikten har vært å gjøre det mulig å ta hensyn til eventuelle a) kostnader knyttet til den pågående innfasingen av nullutslippsferger samt b) konsekvenser for billettinntektene ved en overgang fra riksferge- til AutoPassregulativet for fergetakster. En ny kostnadsmodell basert på optimering og en ny inntektsmodell basert på regresjonsanalyse er derfor foreslått til å beregne kriteriet normerte fergekostnader i lyset av denne utviklingen.

Resultatene fra denne studien viser at beregningene av normerte fergekostnader basert på den nye metodikken langt på vei er sammenfallende med KDDs egne beregninger basert på deres gjeldende metodikk. Noen forskjeller finnes det mellom metodene, som eksempelvis at nullutslippsferger generelt har høyere kapitalkostnader enn dieselferger mens dieselferger generelt har høyere energikostnader enn nullutslippsferger. Men på et overordnet nivå fremstår resultatene som harmonisert mellom de ulike beregningene.

### 7.1 Drøfting av resultatene

#### 7.1.1 Detaljnivå for kostnadsberegningene

Modellen som ble etablert i kapittel 3 gir en generisk top-down kostnadsberegning med fokus på strategiske (flåtestørrelse og fergetype) og taktiske valg (frekvens). Fordelen med denne metodikken er at beregningene er i stand til å gi en overordnet vurdering av kostnadene ved å operere et fergesamband, samt at alle samband behandles likt i kostnadsberegningene. På en annen side vil det alltid eksistere individuelle forskjeller mellom sambandene – som lokal kvalitet på strømmett og/eller tidsvinduer tilgjengelige til lading – som kan påvirke tekniske og økonomiske muligheter for nullutslippsferger og som i begrenset grad fanges opp av modellen i kapittel 3. Å utvide modellen til å omfatte slike lokale faktorer vil bidra til å øke kompleksiteten til beregningene. Dette vil gå på bekostning av kravene om sporbarhet samt å kunne oppdatere beregningene jevnlig. Det vil også lede til en større grad av differensiering av metodikken mellom sambandene. Vi mener derfor det er gode grunner til å beholde top-down-modellen i kapittel 3.

For eksempel er det i realiteten store variasjoner i kostnader knyttet til nettutviding og bygging av ladeinfrastruktur på land. Her er det mange lokale faktorer som spiller inn på totalkostnaden, og det vil trolig ikke være mulig eller ønskelig å ta hensyn til slike kostnadsvariasjoner per samband. Samtidig viser Figur 5 at kapitalkostnader utgjør den minste kostnadsposten for fergedriften, og det er derfor tvilsomt om en mer detaljert beregning av kostnader knyttet til infrastruktur vil påvirke det overordnede kostnadsbildet.

En annen fordel med tilnærmingen som foreslås er at den likner på modellen som benyttes til beregning av kriteriet normerte fergekostnader i dag. Det vil derfor være enklere for brukerne av modellen å sette seg i den foreslåtte metodikken, sammenliknet med et mer komplekst modellapparat som skal tilpasses til det enkelte samband.

### 7.1.2 Parameterusikkerhet

Det er stor grad av usikkerhet knyttet til beregningene av kostnader ved nullutslippsferger. For det første legger våre beregninger til grunn at alle samband kan opereres batteri-elektrisk. Dette forenkler studien og gjør også at vi slipper å velge parameterverdier for f.eks. hydrogenferger hvor teknologien er mer umoden og dermed fremtidig kostnader mer usikre. Samtidig vil det innebære at våre kostnadsberegninger kan framstå som konservative.

For det andre er energikostnadene framover usikre. I dag er strømprisen unormalt høy, men det er usikkert om dette vil være en langvarig situasjon. Landet er også delt inn i ulike prisområder for strøm, men heller ikke dette er tatt hensyn til i våre beregninger av normerte fergekostnader ettersom det normalt er beskjedne forskjeller i prisnivå mellom regionene.

En økning i prisen på strøm vil i hovedsak kunne bidra til at modellen søker å velge fartøy som opererer på lave hastigheter og har et lavt energiforbruk. Samtidig viser beregningene i 6.1.3 at batteriferger er mer energieffektive enn konvensjonelle ferger. Dette betyr at kostnadsminimeringen i mindre grad vil være følsom for endringer i energiprisen sammenliknet med en kostnadsminimering for konvensjonelle ferger. Allikevel viser sensitivitetstester i kapittel 6.5 at fordelingen mellom fylker i noen grad påvirkes av den strømprisen som benyttes i kostnadskalkylen, og at dette utslaget kan ramme enkelte fylker spesielt hardt. Det vil derfor være hensiktsmessig å oppdatere prisene i modellen generelt og energiprisen spesielt etter hvert som ny informasjon om prisutviklingen foreligger.

### 7.1.3 Tiltakskostnader

Resultatene i kapittel 6.1.3 kan gi et inntrykk av at kostnadene ved innfasing av nullutslippsferger er negative. Det er derfor viktig å understreke at denne rapporten ikke søker å beregne tiltakskostnader, og at sammenlikningen av våre og KDDs resultater ikke bør tas til inntekt for fravær av tiltakskostnader knyttet til det grønne skiftet i fergesektoren. Beregningene som sammenliknes er basert på ulike modeller med sine individuelle parametere og forutsetninger, noe som i stor grad er med på å drive fram forskjeller i resultater mellom modellene. Sammenlikningen av modellene i kapittel 6.1.3 er først og fremst benyttet som et ledd i valideringen av den nye modellen.

## 7.2 Anbefalinger

Kapittel 6.4 viser at beregningen av kriteriet normerte fergekostnader med den nye metodikken og valgte parameterverdier gir sammenliknbare resultater som den eksisterende metodikken KDD bruker i dag. Med tanke på at en fullstendig omlegging av dagens metodikk til å beregne kriteriet normerte fergekostnader kan ha betydelige kostnader både for KDD og fylkene – f.eks. forbundet med å forstå og å anvende den nye modellen – anbefaler vi en videreføring av deler av eksisterende metodikk til beregning av normerte fergekostnader på kort sikt. Dette gjelder konkret for kostnadsmodellen siden den nye modellen er langt mer kompleks enn modellen KDD anvender og dermed kjenner godt i dag. Det er også betydelig usikkerhet knyttet til flere av parameterne i den nye kostnadsmodellen, som bl.a. teknologiutvikling og prisen på energi, noe som også trekker i retning av at det kan være hensiktsmessig å vente med innføringen av den nye kostnadsmodellen inntil man har mer kunnskap om denne utviklingen framover. På lengre sikt vil det være hensiktsmessig å revidere og å

implementere en kostnadsmodell for nullutslippsferger i beregningen av normerte fergekostnader.

Det gjelder ett viktig unntak fra denne anbefalingen, nemlig beregningen av billettinntekter. Denne rapporten foreslår en alternativ beregning av inntekter basert på regresjonsanalyse. Resultatene fra den alternative beregningen basert på AutoPASS-regulativet avviker noe fra KDDs egne resultater basert på riksfergeregulativet, samtidig som de nye inntektsberegningene er langt enklere å oppdatere jevnlig enn KDDs gjeldende metodikk. Dette gjelder både oppdatering av normerte inntekter, men også av parameterestimatene som brukes til å predikere billettinntektene. Dette gjør det mulig å oppdatere beregningsmetodikken oftere, noe som kan være en fordel ettersom myndighetenes pågående arbeid for å gjøre fergetransport rimeligere kan føre til hyppige endringer i fergetakster og dermed gjøre de anbefalte inntektsberegningene utdatert på sikt.

## 8 Referanser

- Andersen, S.N. og T. Tørset (2019) Waiting time for ferry services: Empirical evidence from Norway. *Case Studies on transport Policy*, 7, 667-676.
- Cole, W., A.W. Frazier og C. Augustine, Cost projections for utility-scale battery storage: 2021 update. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
- Danebergs, J., A. Buskop og Ø. Sørdal Fosen (2022) Charging and bunkering infrastructure for zero emission high speed ferries. Upublisert IFE-rapport.
- Flügel, S., Halse, A.H., Hulleberg, N., Jordbakke, G.N., Veisten, K., Sundfør, H.B. og M. Kouwenhoven (2020) Verdsetting av reisetid og tidsavhengige faktorer. Dokumentasjonsrapport til Verdisettingsstudien 2018-2019. TØI rapport 1762/2020.
- Grønland, S.E. (2022) Kostnadsmodeller for transport og logistikk. Basisår 2021. TØI rapport nr. 1884/2022. Transportøkonomisk institutt, Oslo.
- Halse, A.H., Mjøsund, C.S., Killi, M., Flügel, S., Jordbakke, G.N., Hovi, I.B., Kouwenhoven, M. og G. de Jong (2019) Bedrifiers verdsetting av raskere og mer pålitelig transport. Den norske verdsettingsstudien for godstransport 2018. TØI rapport nr. 1680/2019. Transportøkonomisk institutt, Oslo.
- Holtrop, J. og G.G.J. Mennen (1978) A statistical power prediction method. *International Shipbuilding Progress*, 25.
- Holtrop, J. og G.G.J. Mennen (1982) An approximate power prediction method. *International Shipbuilding Progress*, 29.
- Holtrop, J., (1984) A statistical re-analysis of resistance and propulsion data. *International Shipbuilding Progress*, 31.
- Jørgensen, F., Mathisen, T. og G. Solvoll (2007) Kapasitet i fergesektoren. SIB-rapport 1/2007. Handelshøgskolen i Bodø
- Kommunal- og moderniseringsdepartementet (2019) Høring - Forslag til nytt inntektssystem for fylkeskommunene. URL: <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/horing---forslag-til-nytt-inntektssystem-for-fylkeskommunene/id2622524/>
- Menon og AFRY (2020) Scenarioanalyse av infrastrukturbehov for alternative drivstoff til fartøy i maritim sektor. AFRY Management Consulting.
- NVE (2021) Langsiktig kraftmarkedsanalyse 2021-2040.
- Oslo Economics (2021) Konsekvensanalyse av endringer i takst og rabattstrukturen i ferjedriften. OE-rapport 2021-49.
- Skatteetaten. Avgift på elektrisk kraft. n.d. 2019/06/03/; URL: <https://www.skatteetaten.no/bedrift-og-organisasjon/avgifter/saravgifter/om/elektrisk-kraft>.
- Statens vegvesen (2015) Dokumentasjon av beregningsmoduler i EFFEKT 6.6. Statens vegvesens rapporter nr. 358.
- Statens vegvesen (2018) Ferjedriftsstandard 2018. Forslag til endringer av ferjedriftsstandard NTP 2010-2019. Upublisert notat
- Svendsen, H., F. Müller, H. Thune-Larsen og S. Bråthen (2017) Utgiftsbehov til ferjer og hurtigbåter. Rapport nr. 1701. Møreforskning Molde
- Tveter, E., K. L. Rødseth, J. H. Rødal, K. L. Hoff og H. Thune-Larsen (2020) Forslag til nye kriterier for båter i inntektssystemet for fylkeskommunene. Rapport nr. 2003. Møreforskning Molde
- Wardman, M. (2016) A review of British evidence on time and service quality valuation. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 37, 107–128.

# Vedlegg

## V 1. GAMS-kode

\$TITLE COST MODEL FOR A BATTERY ELECTRIC FERRY SERVICE SERVICE

SETS

I set of services /i1\*i107/

itest(I) /i17,i58/

ChQ number of chargers /ch1\*ch2/

VListKDD

/Sambandsnummer,Navn,Fylkesnr,Fylke,PBE,Elbil,Kaier,Rundturlengde,Fartsomrade/

VListVessel /Pv,Cv,Zv,Batterikostnad,

TotkostFo,TotkostFoC,TotkostFoD,LsrvFo,LjrvFo,LsrvFoCD,LjrvFoCD,Ev,Sv,Tqv /

T set of periods /t1\*t6/

Tu(T) periods weekday /t1\*t3/

Th(T) periods weekend /t4\*t6/

Tsel(T)

Tusel(Tu)

Thsel(Th)

S set of power installation (mW) /s1\*s15/

VInt set of vessels /v1\*v16/

V(VInt) set of selected vessels

F set of frequencies /f1\*f16/

Y set av flåtestørrelse /y1\*y5/

Resstat resultmatrise /ResTCMFM,ResTCEks1,ResTCEks2,ResTCEks3,ResTCEnd,

ResLMFM,ResLEks1,ResLEks2,ResLEks3,ResLEnd,

ResKMFm,ResKEks1,ResKEks2,ResKEks3,ResKEnd,



ResEMFM,ResEEks1,ResEEks2,ResEEks3,ResEEnd,  
ResOMFM,ResOEks1,ResOEks2,ResOEks3,ResOEnd/

;

#### PARAMETERS

KDDMat(I,VListKDD)

VesselMat(VInt,VListVessel)

\*Rundturlengde

RTL(I)

\* Days per year

BND Number of business days/251/

WND Number of holidays /114/

\*Demand

D(I) ADT PBE per connection

D0 selected service

DIntu(I) ADT PBE weekdays

Du

DInth(I) ADT PBE weekends

Dh

AInt(I,T) Time of day distribution

A(T)

\*Planning horisont and time parameters

TPInt(I,T) planning period in hours

TP(T)

TPadj(T) justerer timer for bemanning

Tr(VInt) tidsbruk per rundtur med fartøy v

TrInt(I,VInt) hjelpevar

Tad time for arrival and departure per stop (hrs) /0.043/

Tlo(VInt) time for loading and unloading per stop (hrs)

\*Ferry frequency standard

$RuInt(I)$  total number of departures - weekdays

$Ru$

$RhInt(I)$  total number of departures - weekends

$Rh$

$RsfInt(I,T)$  total number of departures - stiv frekvens

$Rsf$

\*vessel characteristics

$P(VInt)$  Passenger capacity

$C(VInt)$  battery capacity

$EInt(I,VInt)$  Energy consumption per roundtrip

$E(VInt)$  energy per roundtrip

$LsrInt(I,VInt)$

$LjrInt(I,VInt)$

$Lsr(VInt)$  Senior crew members (no)

$Ljr(VInt)$  Junior crew members

$Z(VInt)$  Maximal charging capacity of battery

$Speed(VInt)$  sailing speed /v1 14.1, v2 15.3, v3 16.3, v4 17.3, v5 18.3,

v6 19.2, v7 20.0, v8 20.8,

v9 14.1, v10 15.3, v11 16.3, v12 17.3, v13 18.3,

v14 19.2, v15 20.0, v16 20.8/

\*Operator costs

$IC$  infrastructur cost (mNOK per MW) /0.39/

$XInt(I,VInt)$

$X(VInt)$  capital costs

$WInt(I)$  energy costs (dependent on no of departures - ferry standard)

$W$

Qsr day rate senior crew members (mNOK) /0.004136/

Qjr day rate junior crew member (mNOK) /0.003115/

\*Passenger costs

VOT value of time /0.000133/

Tw(Y,F,T) waiting time costs per passenger (Mohring formula)

\*Andel andre driftskostnader

Oy andel andre driftskostnader /y1 2.59, y2 1.41, y3 0.91,  
y4 0.91, y5 0.91/

\*Ladere

NInt(ChQ) antall ladere per scenario /ch1 1, ch2 2/

Nchrg

\*Big M

M1 linearisering av nettkapasitet

M2

\*Flaate

Ymax

;

\*\*\*\*\*

\$!libinclude xliimport KDDMat C:\Users\klr\Dropbox\GAMSprivat\FERGEKOST\KDDdata.xls  
a1:j108

\$!libinclude xliimport VesselMat  
C:\Users\klr\Dropbox\GAMSprivat\FERGEKOST\Vesseldata2.xls a1:o17

Ymax = card(Y);

D(I) = KDDMat(I,'PBE')/(BND+WND);

RTL(I) = KDDMat(I,'Rundturlengde');

Display D;

\*Definere fergestandard per samband

$$\text{RuInt}(I)\$(D(I) \text{ ge } 3000) = 48;$$

$$\text{RuInt}(I)\$((D(I) \text{ lt } 3000)\$(D(I) \text{ ge } 2000)) = 39;$$

$$\text{RuInt}(I)\$((D(I) \text{ lt } 2000)\$(D(I) \text{ ge } 1000)) = 31;$$

$$\text{RuInt}(I)\$((D(I) \text{ lt } 1000)\$(D(I) \text{ ge } 500)\$(\text{RTL}(I)/2 \text{ le } 4)) = 27;$$

$$\text{RuInt}(I)\$((D(I) \text{ lt } 750)\$(D(I) \text{ ge } 500)\$(\text{RTL}(I)/2 \text{ gt } 4)) = 17;$$

$$\text{RuInt}(I)\$((D(I) \text{ lt } 1000)\$(D(I) \text{ ge } 750)\$(\text{RTL}(I)/2 \text{ gt } 4)) = 22;$$

$$\text{RuInt}(I)\$((D(I) \text{ lt } 500)\$(D(I) \text{ ge } 100)\$(\text{RTL}(I)/2 \text{ le } 4)) = 21;$$

$$\text{RuInt}(I)\$((D(I) \text{ lt } 500)\$(D(I) \text{ ge } 100)\$(\text{RTL}(I)/2 \text{ gt } 4)\$(\text{RTL}(I)/2 \text{ le } 9)) = 15;$$

$$\text{RuInt}(I)\$((D(I) \text{ lt } 500)\$(D(I) \text{ ge } 100)\$(\text{RTL}(I)/2 \text{ gt } 9)\$(\text{RTL}(I)/2 \text{ le } 20)) = 9;$$

$$\text{RuInt}(I)\$((D(I) \text{ lt } 500)\$(D(I) \text{ ge } 100)\$(\text{RTL}(I)/2 \text{ gt } 20)) = 7;$$

$$\text{RuInt}(I)\$((D(I) \text{ lt } 100)\$(D(I) \text{ ge } 25)\$(\text{RTL}(I)/2 \text{ le } 15)) = 7;$$

$$\text{RuInt}(I)\$((D(I) \text{ lt } 100)\$(D(I) \text{ ge } 25)\$(\text{RTL}(I)/2 \text{ gt } 15)) = 4;$$

$$\text{RuInt}(I)\$(D(I) \text{ lt } 25) = 5;$$

\*

$$\text{RhInt}(I)\$(D(I) \text{ ge } 3000) = 48;$$

$$\text{RhInt}(I)\$((D(I) \text{ lt } 3000)\$(D(I) \text{ ge } 2000)) = 39;$$

$$\text{RhInt}(I)\$((D(I) \text{ lt } 2000)\$(D(I) \text{ ge } 1000)) = 27;$$

$$\text{RhInt}(I)\$((D(I) \text{ lt } 1000)\$(D(I) \text{ ge } 500)\$(\text{RTL}(I)/2 \text{ le } 4)) = 24;$$

$$\text{RhInt}(I)\$((D(I) \text{ lt } 750)\$(D(I) \text{ ge } 500)\$(\text{RTL}(I)/2 \text{ gt } 4)) = 15;$$

$$\text{RhInt}(I)\$((D(I) \text{ lt } 1000)\$(D(I) \text{ ge } 750)\$(\text{RTL}(I)/2 \text{ gt } 4)) = 19;$$

$$\text{RhInt}(I)\$((D(I) \text{ lt } 500)\$(D(I) \text{ ge } 100)\$(\text{RTL}(I)/2 \text{ le } 4)) = 19;$$

$$\text{RhInt}(I)\$((D(I) \text{ lt } 500)\$(D(I) \text{ ge } 100)\$(\text{RTL}(I)/2 \text{ gt } 4)\$(\text{RTL}(I)/2 \text{ le } 9)) = 13;$$

$$\text{RhInt}(I)\$((D(I) \text{ lt } 500)\$(D(I) \text{ ge } 100)\$(\text{RTL}(I)/2 \text{ gt } 9)\$(\text{RTL}(I)/2 \text{ le } 20)) = 7;$$

$$\text{RhInt}(I)\$((D(I) \text{ lt } 500)\$(D(I) \text{ ge } 100)\$(\text{RTL}(I)/2 \text{ gt } 20)) = 6;$$

$$\text{RhInt}(I)\$((D(I) \text{ lt } 100)\$(D(I) \text{ ge } 25)\$(\text{RTL}(I)/2 \text{ le } 15)) = 7;$$

$$\text{RhInt}(I)\$(D(I) \text{ lt } 100)\$(D(I) \text{ ge } 25)\$(\text{RTL}(I)/2 \text{ gt } 15)) = 4;$$

$$\text{RhInt}(I)\$(D(I) \text{ lt } 25) = 5;$$

$$\text{RsfInt}(I, 't1')\$(D(I) \text{ ge } 2000) = 16;$$

$$\text{RsfInt}(I, 't2')\$(D(I) \text{ ge } 2000) = 10;$$

$$\text{RsfInt}(I, 't4')\$(D(I) \text{ ge } 2000) = 16;$$

$$\text{RsfInt}(I, 't5')\$(D(I) \text{ ge } 2000) = 10;$$

\*Display RuInt, RhInt;

$$\text{WInt}(I)\$(\text{RuInt}(I) \text{ le } 15) = 1.32;$$

$$\text{WInt}(I)\$(\text{RuInt}(I) \text{ gt } 15)\$(\text{RuInt}(I) \text{ le } 25) = 1.26;$$

$$\text{WInt}(I)\$(\text{RuInt}(I) \text{ gt } 25)\$(\text{RuInt}(I) \text{ le } 35) = 1.19;$$

$$\text{WInt}(I)\$(\text{RuInt}(I) \text{ gt } 35)\$(\text{RuInt}(I) \text{ le } 45) = 1.14;$$

$$\text{WInt}(I)\$(\text{RuInt}(I) \text{ gt } 45) = 1.11;$$

\*\*\*\*\*

\*Definere planperiode og etterspørsel per samband

\*Alle samband er åpen på dagtid i uke og helg

$$\text{TPInt}(I, 't1') = 8;$$

$$\text{TPInt}(I, 't4') = 8;$$

\*FV1 har 24 t åpningstid i uken og helgen

$$\text{TPInt}(I, 't2')\$(D(I) \text{ ge } 2000) = 8;$$

$$\text{TPInt}(I, 't3')\$(D(I) \text{ ge } 2000) = 8;$$

$$\text{TPInt}(I, 't5')\$(D(I) \text{ ge } 2000) = 8;$$

$$\text{TPInt}(I, 't6')\$(D(I) \text{ ge } 2000) = 8;$$

\*FV2 og 3 har 18 t per ukedag og 16 timer per helg

$$\text{TPInt}(I, 't2')\$(D(I) \text{ lt } 2000)\$(D(I) \text{ ge } 500) = 8;$$

$$\text{TPInt}(I, 't3')\$(D(I) \text{ lt } 2000)\$(D(I) \text{ ge } 500) = 2;$$

$$\text{TPInt}(I, 't5') \$(D(I) \text{ lt } 2000) \$(D(I) \text{ ge } 500) = 8;$$

$$\text{TPInt}(I, 't6') \$(D(I) \text{ lt } 2000) \$(D(I) \text{ ge } 500) = 0;$$

\*FV4 har 16 timer i uken og 14 timer i helgen

$$\text{TPInt}(I, 't2') \$(D(I) \text{ lt } 500) \$(D(I) \text{ ge } 100) = 8;$$

$$\text{TPInt}(I, 't3') \$(D(I) \text{ lt } 500) \$(D(I) \text{ ge } 100) = 0;$$

$$\text{TPInt}(I, 't5') \$(D(I) \text{ lt } 500) \$(D(I) \text{ ge } 100) = 6;$$

$$\text{TPInt}(I, 't6') \$(D(I) \text{ lt } 500) \$(D(I) \text{ ge } 100) = 0;$$

\*FV5 har 14 timer i uken og helgen

$$\text{TPInt}(I, 't2') \$(D(I) \text{ lt } 100) = 6;$$

$$\text{TPInt}(I, 't3') \$(D(I) \text{ lt } 100) = 0;$$

$$\text{TPInt}(I, 't5') \$(D(I) \text{ lt } 100) = 6;$$

$$\text{TPInt}(I, 't6') \$(D(I) \text{ lt } 100) = 0;$$

\*Display TPInt;

\*Etterspørsel over ukedag døgnet

$$\text{DIntu}(I) = D(I) * 365 / (\text{BND} + \text{WND} * 0.8);$$

$$\text{DInth}(I) = 0.8 * \text{DIntu}(I);$$

\*Display D, DIntu, DInth;

\*

$$\text{AInt}(I, 't1') \$(\text{TPInt}(I, 't3') \text{ gt } 0) = 0.53;$$

$$\text{AInt}(I, 't2') \$(\text{TPInt}(I, 't3') \text{ gt } 0) = 0.32;$$

$$\text{AInt}(I, 't3') \$(\text{TPInt}(I, 't3') \text{ gt } 0) = 0.15;$$

$$\text{AInt}(I, 't4') \$(\text{TPInt}(I, 't3') \text{ gt } 0) = 0.53;$$

$$\text{AInt}(I, 't5') \$(\text{TPInt}(I, 't3') \text{ gt } 0) = 0.37;$$

$$\text{AInt}(I, 't6') \$(\text{TPInt}(I, 't3') \text{ gt } 0) = 0.10;$$

$$AInt(I, 't1') \$(TPInt(I, 't3') \text{ eq } 0) = 0.53 + 0.08;$$

$$AInt(I, 't2') \$(TPInt(I, 't3') \text{ eq } 0) = 0.32 + 0.07;$$

$$AInt(I, 't4') \$(TPInt(I, 't3') \text{ eq } 0) = 0.53 + 0.06;$$

$$AInt(I, 't5') \$(TPInt(I, 't3') \text{ eq } 0) = 0.37 + 0.04;$$

\*Display AInt;

\*\*\*\*\*

\*Bemanning etter fartsområde

$$LsrInt(I, VInt) \$(KDDMat(I, 'fartsomrade') \text{ le } 2) = \text{VesselMat}(VInt, 'LsrvFo');$$

$$LsrInt(I, VInt) \$(KDDMat(I, 'fartsomrade') \text{ gt } 2) = \text{VesselMat}(VInt, 'LsrvFoCD');$$

$$LjrInt(I, VInt) \$(KDDMat(I, 'fartsomrade') \text{ le } 2) = \text{VesselMat}(VInt, 'LjrvFo');$$

$$LjrInt(I, VInt) \$(KDDMat(I, 'fartsomrade') \text{ gt } 2) = \text{VesselMat}(VInt, 'LjrvFoCD');$$

\*Display LsrInt;

\*Kapitalkostnad etter fartsområde

$$XInt(I, VInt) \$(KDDMat(I, 'fartsomrade') \text{ le } 2) = 0.04$$

$$*((\text{VesselMat}(VInt, 'TotkostFo') + \text{VesselMat}(VInt, 'Batterikostnad')) / (1 - \exp(-1 * 0.04 * 30)));$$

$$XInt(I, VInt) \$(KDDMat(I, 'fartsomrade') \text{ gt } 2) \$(KDDMat(I, 'fartsomrade') \text{ le } 4) = 0.04$$

$$*((\text{VesselMat}(VInt, 'TotkostFoC') + \text{VesselMat}(VInt, 'Batterikostnad')) / (1 - \exp(-1 * 0.04 * 30)));$$

$$XInt(I, VInt) \$(KDDMat(I, 'fartsomrade') \text{ gt } 4) = 0.04$$

$$*((\text{VesselMat}(VInt, 'TotkostFoD') + \text{VesselMat}(VInt, 'Batterikostnad')) / (1 - \exp(-1 * 0.04 * 30)));$$

\*Display XInt;

\*\*\*\*\*

\* Fartøysattributter

$$P(VInt) = \text{VesselMat}(VInt, 'Pv');$$



$C(VInt) = VesselMat(VInt, 'Cv');$

$Z(VInt) = VesselMat(VInt, 'Zv');$

$EInt(I, VInt) = VesselMat(VInt, 'Ev') * RTL(I);$

$Tlo(VInt) = VesselMat(VInt, 'Tqv');$

$TrInt(I, VInt) = RTL(I) / (Speed(VInt) * 1.852);$

\*Display TrInt;

\*Big-M

$M1 = card(Y) * 8;$

$M2 = 380 * smax(I, WInt(I)) * smax((I, VInt), EInt(I, VInt)) * card(Y) * card(F);$

\*\*\*\*\*

\*

\* VARIABLES

\*\*\*\*\*

VARIABLE

Obj målfunksjon

;

POSITIVE VARIABLE

Alfa(T) netto tid til lading

Beta1(S,T) linearisering

Ypsilon(T) ladetid i hver planleggingsperiode

o andre driftskostnader

;

BINARY VARIABLE

Gamma(S) valg av effekt for ladeinfrastruktur

Lambda(VInt) velger fartøystype

Delta(Y,F,VInt,T) frekvens på tidspunkt t

Theta(Y) valg av flåtestørrelse

;

INTEGER VARIABLE

yf(VInt) antall fartøy av type v

yft(VInt,T) antall fartøy per periode

n(VInt,T) frekvens per fartøystype

;

EQUATIONS

Maalfunksjon Objective function

Maalfunksjon\_ext med passasjerenes reise og ventetid

Personbilkap\_u(Tu)

Personbilkap\_h(Th)

Kaputn\_u

Kaputn\_h

Kaputn\_ext\_u(Tu)

Kaputn\_ext\_h(Th)

Fergestandard\_u

Fergestandard\_h

Fergestandard\_sf(T)

Nettkap\_lin1(T)

Nettkap\_lin2(S,T)

Nettcons

Tidscons(T)

Tidscons\_anlop(T)

Flaatecons(VInt,T)

Flaatecons2(VInt)

Andrekost\_tot(Y)

Ycons

Lincons1(T)

Lincons2(VInt)

Lincons3(VInt,T)

Lincons4(VInt,T)

Gammasumcons

Thetasumcons

Lambdasumcons

;

Maalfunksjon.. Obj =e=

$$\begin{aligned} & NChrg*IC*sum(S,ord(S)*Gamma(S)) + \\ & sum(V,X(V)*yf(V)) + \\ & 251*W*sum((V,Tusel),E(V)*n(V,Tusel)) + \\ & 114*W*sum((V,Thsel),E(V)*n(V,Thsel)) + \\ & 251*sum((V,Tusel),(TPadj(Tusel)/8)*(Qsr*Lsr(V) + Qjr*Ljr(V))*yft(V,Tusel)) + \\ & 114*1.1875*sum((V,Thsel),(TPadj(Thsel)/8)*(Qsr*Lsr(V) + Qjr*Ljr(V))*yft(V,Thsel)) + \\ & 0; \end{aligned}$$

Maalfunksjon\_ext.. Obj =e=

$$\begin{aligned} & NChrg*IC*sum(S,ord(S)*Gamma(S)) + \\ & sum(V,X(V)*yf(V)) + \\ & 251*W*sum((V,Tusel),E(V)*n(V,Tusel)) + \\ & 114*W*sum((V,Thsel),E(V)*n(V,Thsel)) + \\ & 251*sum((V,Tusel),(TPadj(Tusel)/8)*(Qsr*Lsr(V) + Qjr*Ljr(V))*yft(V,Tusel)) + \\ & 114*1.1875*sum((V,Thsel),(TPadj(Thsel)/8)*(Qsr*Lsr(V) + Qjr*Ljr(V))*yft(V,Thsel)) + \\ & 0 + \end{aligned}$$

$$\text{VOT} * 1.5 * \text{sum}((Y, F, V, \text{Tsel}), \text{Tw}(Y, F, \text{Tsel}) * (251 * 1.4 * A(\text{Tsel}) * \text{Du} + 114 * 1.4 * A(\text{Tsel}) * \text{Dh}) * \text{Delta}(Y, F, V, \text{Tsel}))$$

;

$$\text{Personbilkap\_u}(\text{Tusel}).. \text{sum}(V, P(V) * n(V, \text{Tusel})) = g = 0.5 * A(\text{Tusel}) * \text{Du};$$

$$\text{Personbilkap\_h}(\text{Thsel}).. \text{sum}(V, P(V) * n(V, \text{Thsel})) = g = 0.5 * A(\text{Thsel}) * \text{Dh};$$

$$\text{Kaputn\_u}.. 0.35 * \text{sum}((\text{Tusel}, V), P(V) * n(V, \text{Tusel})) = g = 0.5 * \text{Du};$$

$$\text{Kaputn\_h}.. 0.35 * \text{sum}((\text{Thsel}, V), P(V) * n(V, \text{Thsel})) = g = 0.5 * \text{Dh};$$

$$\text{Kaputn\_ext\_u}(\text{Tusel}).. 0.35 * \text{sum}(V, P(V) * n(V, \text{Tusel})) = g = 0.5 * A(\text{Tusel}) * \text{Du};$$

$$\text{Kaputn\_ext\_h}(\text{Thsel}).. 0.35 * \text{sum}(V, P(V) * n(V, \text{Thsel})) = g = 0.5 * A(\text{Thsel}) * \text{Dh};$$

$$\text{Fergestandard\_u}.. \text{sum}((V, \text{Tusel}), n(V, \text{Tusel})) = g = \text{Ru};$$

$$\text{Fergestandard\_h}.. \text{sum}((V, \text{Thsel}), n(V, \text{Thsel})) = g = \text{Rh};$$

$$\text{Fergestandard\_sf}(\text{Tsel}).. \text{sum}(V, n(V, \text{Tsel})) = g = \text{Rsf}(\text{Tsel});$$

$$\text{Nettkap\_lin1}(\text{Tsel}).. \text{sum}(S, 1000 * \text{ord}(S) * \text{Beta1}(S, \text{Tsel})) = g = \text{sum}(V, E(V) * n(V, \text{Tsel}));$$

$$\text{Nettkap\_lin2}(S, \text{Tsel}).. \text{Beta1}(S, \text{Tsel}) = l = M1 * (\text{Gamma}(S));$$

$$\text{Nettcons}.. \text{sum}(S, 1000 * \text{ord}(S) * \text{Gamma}(S)) = l = \text{sum}(V, Z(V) * \text{Lambda}(V));$$

$$\text{Tidscons}(\text{Tsel}).. \text{sum}(V, (\text{Tr}(V) + 2 * (\text{Tad} + \text{Tlo}(V))) * n(V, \text{Tsel})) + \text{Alfa}(\text{Tsel}) = l = \text{TP}(\text{Tsel}) * \text{sum}(V, \text{yft}(V, \text{Tsel}));$$

$$\text{Tidscons\_anlop}(\text{Tsel}).. \text{Alfa}(\text{Tsel}) = g = \text{sum}(S, \text{Beta1}(S, \text{Tsel})) - 2 * \text{sum}(V, \text{Tlo}(V) * n(V, \text{Tsel}));$$

$$\text{Flaatecons}(V, \text{Tsel}).. \text{yft}(V, \text{Tsel}) = l = \text{yf}(V);$$

Flaatecons2(V)..  $\text{card}(Y) * \text{Lambda}(V) = g = yf(V);$

Andrekost\_tot(Y)..  $o = g = O_y(Y) * (251 * W * \text{sum}((V, \text{Tusel}), E(V) * n(V, \text{Tusel})) + 114 * W * \text{sum}((V, \text{Thsel}), E(V) * n(V, \text{Thsel}))) - M2 * (1 - \text{Theta}(Y));$

Ycons..  $\text{sum}(Y, \text{ord}(Y) * \text{Theta}(Y)) = e = \text{sum}(V, yf(V));$

\*\*\*\*\*

\*Endringer

Lincons1(Tsel)..  $\text{sum}((Y, F, V), \text{Delta}(Y, F, V, \text{Tsel})) = e = 1;$

Lincons2(V)..  $\text{sum}((Y, F, \text{Tsel}), \text{Delta}(Y, F, V, \text{Tsel})) = l = \text{card}(\text{Tsel}) * \text{Lambda}(V);$

Lincons3(V, Tsel)..  $n(V, \text{Tsel}) = e = \text{sum}((Y, F), \text{Ord}(Y) * \text{ord}(F) * \text{Delta}(Y, F, V, \text{Tsel}));$

Lincons4(V, Tsel)..  $yft(V, \text{Tsel}) = e = \text{sum}((Y, F), \text{ord}(Y) * \text{Delta}(Y, F, V, \text{Tsel}));$

Gammasumcons..  $\text{sum}(S, \text{Gamma}(S)) = e = 1;$

Thetasumcons..  $\text{sum}(Y, \text{Theta}(Y)) = e = 1;$

Lambdasumcons..  $\text{sum}(V, \text{Lambda}(V)) = e = 1;$

\*\*\*\*\*

\* KONTROLLERT KODE

Model

MFM /Maalfunksjon, Kaputn\_u, Kaputn\_h,

Fergestandard\_u, Fergestandard\_h, Fergestandard\_sf,

Nettkap\_lin1, Nettkap\_lin2, Nettcons,

Tidscons, Tidscons\_anlop, Flaatecons, Flaatecons2,

Andrekost\_tot, Ycons,

Lincons1, Lincons2, Lincons3, Lincons4,

Gammasumcons, Thetasumcons, Lambdasumcons/

Eksogen1 /Maalfunksjon,

Personbilkap\_u, Personbilkap\_h,  
Fergestandard\_u, Fergestandard\_h, Fergestandard\_sf,  
Nettkap\_lin1, Nettkap\_lin2, Nettcons,  
Tidscons, Tidscons\_anlop, Flaatecons, Flaatecons2,  
Andrekost\_tot, Ycons,  
Lincons1, Lincons2, Lincons3, Lincons4,  
Gammasumcons, Thetasumcons, Lambdasumcons/

Eksogen2 /Maalfunksjon,

Kaputn\_u, Kaputn\_h,  
Personbilkap\_u, Personbilkap\_h,  
Fergestandard\_u, Fergestandard\_h, Fergestandard\_sf,  
Nettkap\_lin1, Nettkap\_lin2, Nettcons,  
Tidscons, Tidscons\_anlop, Flaatecons, Flaatecons2,  
Andrekost\_tot, Ycons,  
Lincons1, Lincons2, Lincons3, Lincons4,  
Gammasumcons, Thetasumcons, Lambdasumcons/

Eksogen3 /Maalfunksjon,

Kaputn\_ext\_u, Kaputn\_ext\_h,  
Fergestandard\_u, Fergestandard\_h, Fergestandard\_sf,  
Nettkap\_lin1, Nettkap\_lin2, Nettcons,  
Tidscons, Tidscons\_anlop, Flaatecons, Flaatecons2,  
Andrekost\_tot, Ycons,  
Lincons1, Lincons2, Lincons3, Lincons4,  
Gammasumcons, Thetasumcons, Lambdasumcons/

Endogen /Maalfunksjon\_ext,

Personbilkap\_u, Personbilkap\_h,  
Nettkap\_lin1, Nettkap\_lin2, Nettcons,

Tidscons,Tidscons\_anlop,Flaatecons,Flaatecons2,  
Andrekost\_tot,Ycons,  
Lincons1,Lincons2,Lincons3,Lincons4,  
Gammasumcons,Thetasumcons,Lambdasumcons/  
;

Option MIP =XPRESS;

Option Optcr = 0;

alias (I,Iter);

parameter

TotcIntMFM(I,ChQ)

TotcMFM(I)

LabcIntMFM(I,ChQ)

LabcMFM(I)

CapcIntMFM(I,ChQ)

CapcMFM(I)

EnergcIntMFM(I,ChQ)

EnergcMFM(I)

OthcIntMFM(I,ChQ)

OthcMFM(I)

TotcIntEks1(I,ChQ)

TotcEks1(I)

LabcIntEks1(I,ChQ)

LabcEks1(I)

CapcIntEks1(I,ChQ)

CapcEks1(I)

EnergcIntEks1(I,ChQ)

EnergcEks1(I)

OthcIntEks1(I,ChQ)

OthcEks1(I)



TotcIntEks2(I,ChQ)

TotcEks2(I)

LabcIntEks2(I,ChQ)

LabcEks2(I)

CapcIntEks2(I,ChQ)

CapcEks2(I)

EnergIntEks2(I,ChQ)

EnergEks2(I)

OthcIntEks2(I,ChQ)

OthcEks2(I)

TotcIntEks3(I,ChQ)

TotcEks3(I)

LabcIntEks3(I,ChQ)

LabcEks3(I)

CapcIntEks3(I,ChQ)

CapcEks3(I)

EnergIntEks3(I,ChQ)

EnergEks3(I)

OthcIntEks3(I,ChQ)

OthcEks3(I)

TotcIntEnd(I,ChQ)

TotcEnd(I)

LabcIntEnd(I,ChQ)

LabcEnd(I)

CapcIntEnd(I,ChQ)

CapcEnd(I)

EnergIntEnd(I,ChQ)

EnergEnd(I)

OthcIntEnd(I,ChQ)

OthcEnd(I)

Resmat(I,Resset) resultatmatrise

;

loop(ChQ,

NChrg = NInt(ChQ);

loop(Iter\$(0.6\*C('v14') ge EInt(Iter,'v14')/NChrg),

Ru = RuInt(Iter);

Rh = RhInt(Iter);

Rsf(T) = RsfInt(Iter,T);

TP(T) = TPInt(Iter,T);

Display TP;

TPadj(T) = TP(T)\$ (TP(T) le 2) + 8\$(TP(T) gt 2);

Display TPadj;

Du = DIntu(Iter);

Dh = DInth(Iter);

A(T) = AInt(Iter,T);

W = WInt(Iter)/1000000;

V(VInt)\$ (0.6\*C(VInt) ge EInt(Iter,VInt)/NChrg) = YES;

Tsel(T)\$ (TP(T) gt 0) = YES;

Tusel(Tu)\$ (TP(Tu) gt 0) = YES;

Thsel(Th)\$ (TP(Th) gt 0) = YES;

E(V) = EInt(Iter,V);

Lsr(V) = LsrInt(Iter,V);

Ljr(V) = LjrInt(Iter,V);

X(V) = XInt(Iter,V);

Tr(V) = TrInt(Iter,V);

\*Gjennomsnittlig ventetid

$$Tw(Y,F,T) = (1.12 + 4.82\$(Du \text{ gt } 2000) + 0.29*((60*TP(T))/(ord(Y)*ord(F))))/60;$$

Display Ru,Rh,Du,Dh,A,E,Lsr,Ljr,X,W,V,Tr,TP,Tw;

SOLVE MFM using MIP Minimizing Obj;

TotcIntMFM(Iter,ChQ)= Obj.l;

if(MFM.modelstat = 10, TotcIntMFM(Iter,ChQ) = 9999;);

LabcIntMFM(Iter,ChQ)= 251\*sum((V,Tusel),(TPadj(Tusel)/8)\*(Qsr\*Lsr(V) + Qjr\*Ljr(V))\*yft.l(V,Tusel)) +

114\*1.1875\*sum((V,Thsel),(TPadj(Thsel)/8)\*(Qsr\*Lsr(V) + Qjr\*Ljr(V))\*yft.l(V,Thsel));

CapcIntMFM(Iter,ChQ)= NChrg\*IC\*sum(S,ord(S)\*Gamma.l(S)) + sum(V,X(V)\*yf.l(V));

EnergIntMFM(Iter,ChQ) = 251\*W\*sum((V,Tusel),E(V)\*n.l(V,Tusel)) +

114\*W\*sum((V,Thsel),E(V)\*n.l(V,Thsel));

OthcIntMFM(Iter,ChQ) = o.l;

\*\*

SOLVE Eksogen1 using MIP Minimizing Obj;

TotcIntEks1(Iter,ChQ)= Obj.l;

if(Eksogen1.modelstat = 10, TotcIntEks1(Iter,ChQ) = 9999;);

LabcIntEks1(Iter,ChQ)= 251\*sum((V,Tusel),(TPadj(Tusel)/8)\*(Qsr\*Lsr(V) + Qjr\*Ljr(V))\*yft.l(V,Tusel)) +

114\*1.1875\*sum((V,Thsel),(TPadj(Thsel)/8)\*(Qsr\*Lsr(V) + Qjr\*Ljr(V))\*yft.l(V,Thsel));

CapcIntEks1(Iter,ChQ)= NChrg\*IC\*sum(S,ord(S)\*Gamma.l(S)) + sum(V,X(V)\*yf.l(V));

$$\text{EnergIntEks1}(\text{Iter}, \text{ChQ}) = 251 * W * \text{sum}((V, \text{Tusel}), E(V) * n.l(V, \text{Tusel})) + \\ 114 * W * \text{sum}((V, \text{Thsel}), E(V) * n.l(V, \text{Thsel}));$$

$$\text{OthcIntEks1}(\text{Iter}, \text{ChQ}) = 0.l;$$

\*\*

SOLVE Eksogen2 using MIP Minimizing Obj;

$$\text{TotcIntEks2}(\text{Iter}, \text{ChQ}) = \text{Obj}.l;$$

if(Eksogen2.modelstat = 10, TotcIntEks2(Iter,ChQ) = 9999;);

$$\text{LabcIntEks2}(\text{Iter}, \text{ChQ}) = 251 * \text{sum}((V, \text{Tusel}), (\text{TPadj}(\text{Tusel})/8) * (\text{Qsr} * \text{Lsr}(V) + \\ \text{Qjr} * \text{Ljr}(V)) * \text{yft}.l(V, \text{Tusel})) + \\ 114 * 1.1875 * \text{sum}((V, \text{Thsel}), (\text{TPadj}(\text{Thsel})/8) * (\text{Qsr} * \text{Lsr}(V) + \text{Qjr} * \text{Ljr}(V)) * \text{yft}.l(V, \text{Thsel}));$$

$$\text{CapcIntEks2}(\text{Iter}, \text{ChQ}) = \text{NChrg} * \text{IC} * \text{sum}(S, \text{ord}(S) * \text{Gamma}.l(S)) + \text{sum}(V, X(V) * \text{yf}.l(V));$$

$$\text{EnergIntEks2}(\text{Iter}, \text{ChQ}) = 251 * W * \text{sum}((V, \text{Tusel}), E(V) * n.l(V, \text{Tusel})) + \\ 114 * W * \text{sum}((V, \text{Thsel}), E(V) * n.l(V, \text{Thsel}));$$

$$\text{OthcIntEks2}(\text{Iter}, \text{ChQ}) = 0.l;$$

\*\*

SOLVE Eksogen3 using MIP Minimizing Obj;

$$\text{TotcIntEks3}(\text{Iter}, \text{ChQ}) = \text{Obj}.l;$$

if(Eksogen3.modelstat = 10, TotcIntEks3(Iter,ChQ) = 9999;);

$$\text{LabcIntEks3}(\text{Iter}, \text{ChQ}) = 251 * \text{sum}((V, \text{Tusel}), (\text{TPadj}(\text{Tusel})/8) * (\text{Qsr} * \text{Lsr}(V) + \\ \text{Qjr} * \text{Ljr}(V)) * \text{yft}.l(V, \text{Tusel})) + \\ 114 * 1.1875 * \text{sum}((V, \text{Thsel}), (\text{TPadj}(\text{Thsel})/8) * (\text{Qsr} * \text{Lsr}(V) + \text{Qjr} * \text{Ljr}(V)) * \text{yft}.l(V, \text{Thsel}));$$

CapcIntEks3(Iter,ChQ)= NChrg\*IC\*sum(S,ord(S)\*Gamma.l(S)) + sum(V,X(V)\*yf.l(V));

EnergIntEks3(Iter,ChQ) = 251\*W\*sum((V,Tusel),E(V)\*n.l(V,Tusel)) +  
114\*W\*sum((V,Thsel),E(V)\*n.l(V,Thsel));

OthcIntEks3(Iter,ChQ) = o.l;

\*\*

SOLVE Endogen using MIP Minimizing Obj;

TotcIntEnd(Iter,ChQ)= Obj.l;

if(Endogen.modelstat = 10, TotcIntEnd(Iter,ChQ) = 9999;);

LabcIntEnd(Iter,ChQ)= 251\*sum((V,Tusel),(TPadj(Tusel)/8)\*(Qsr\*Lsr(V) +  
Qjr\*Ljr(V))\*yft.l(V,Tusel)) +  
114\*1.1875\*sum((V,Thsel),(TPadj(Thsel)/8)\*(Qsr\*Lsr(V) + Qjr\*Ljr(V))\*yft.l(V,Thsel));

CapcIntEnd(Iter,ChQ)= NChrg\*IC\*sum(S,ord(S)\*Gamma.l(S)) + sum(V,X(V)\*yf.l(V));

EnergIntEnd(Iter,ChQ) = 251\*W\*sum((V,Tusel),E(V)\*n.l(V,Tusel)) +  
114\*W\*sum((V,Thsel),E(V)\*n.l(V,Thsel));

OthcIntEnd(Iter,ChQ) = o.l;

\*

V(VInt) = NO;

option clear = Ru;

option clear = Rh ;

option clear = Rsf;

option clear =TP;

option clear =TPadj;

option clear = Du ;

option clear = Dh;

option clear = A ;

option clear = W;

option clear = Tsel;

option clear = Tusel;

option clear = Thsel;

option clear = E;

option clear = Lsr;

option clear = Ljr;

option clear = X;

option clear = Tr;

)

)

;

\*Display TotcInt;

\*Definer resultatmatriser

TotcMFM(Iter) = smin(ChQ, TotcIntMFM(Iter,ChQ)\$((TotcIntMFM(Iter,ChQ) gt 0)\$TotcIntMFM(Iter,ChQ) lt 9999));

TotcEks1(Iter) = smin(ChQ, TotcIntEks1(Iter,ChQ)\$((TotcIntEks1(Iter,ChQ) gt 0)\$TotcIntEks1(Iter,ChQ) lt 9999));

TotcEks2(Iter) = smin(ChQ, TotcIntEks2(Iter,ChQ)\$((TotcIntEks2(Iter,ChQ) gt 0)\$TotcIntEks2(Iter,ChQ) lt 9999));

TotcEks3(Iter) = smin(ChQ, TotcIntEks3(Iter,ChQ)\$((TotcIntEks3(Iter,ChQ) gt 0)\$TotcIntEks3(Iter,ChQ) lt 9999));

TotcEnd(Iter) = smin(ChQ, TotcIntEnd(Iter,ChQ)\$((TotcIntEnd(Iter,ChQ) gt 0)\$TotcIntEnd(Iter,ChQ) lt 9999));

\*Hvis umulig med kun en lader

loop(Iter\$(0.6\*C('v14') It Elnt(Iter,'v14')),

TotcMFM(Iter)=TotcIntMFM(Iter,'ch2');

TotcEks1(Iter)=TotcIntEks1(Iter,'ch2');

TotcEks2(Iter)=TotcIntEks2(Iter,'ch2');

TotcEks3(Iter)=TotcIntEks3(Iter,'ch2');

TotcEnd(Iter)=TotcIntEnd(Iter,'ch2');

)

;

LabcMFM(Iter) = LabcIntMFM(Iter,'ch1')\$(TotcMFM(Iter) eq TotcIntMFM(Iter,'ch1')) +  
 LabcIntMFM(Iter,'ch2')\$(TotcMFM(Iter) eq TotcIntMFM(Iter,'ch2'));

LabcEks1(Iter) = LabcIntEks1(Iter,'ch1')\$(TotcEks1(Iter) eq TotcIntEks1(Iter,'ch1')) +  
 LabcIntEks1(Iter,'ch2')\$(TotcEks1(Iter) eq TotcIntEks1(Iter,'ch2'));

LabcEks2(Iter) = LabcIntEks2(Iter,'ch1')\$(TotcEks2(Iter) eq TotcIntEks2(Iter,'ch1')) +  
 LabcIntEks2(Iter,'ch2')\$(TotcEks2(Iter) eq TotcIntEks2(Iter,'ch2'));

LabcEks3(Iter) = LabcIntEks3(Iter,'ch1')\$(TotcEks3(Iter) eq TotcIntEks3(Iter,'ch1')) +  
 LabcIntEks3(Iter,'ch2')\$(TotcEks3(Iter) eq TotcIntEks3(Iter,'ch2'));

LabcEnd(Iter) = LabcIntEnd(Iter,'ch1')\$(TotcEnd(Iter) eq TotcIntEnd(Iter,'ch1')) +  
 LabcIntEnd(Iter,'ch2')\$(TotcEnd(Iter) eq TotcIntEnd(Iter,'ch2'));

\*

CapcMFM(Iter) = CapcIntMFM(Iter,'ch1')\$(TotcMFM(Iter) eq TotcIntMFM(Iter,'ch1')) +  
 CapcIntMFM(Iter,'ch2')\$(TotcMFM(Iter) eq TotcIntMFM(Iter,'ch2'));

$$\text{CapcEks1(Iter)} = \text{CapcIntEks1(Iter,'ch1')}\$(\text{TotcEks1(Iter)} \text{ eq } \text{TotcIntEks1(Iter,'ch1')}) + \\ \text{CapcIntEks1(Iter,'ch2')}\$(\text{TotcEks1(Iter)} \text{ eq } \text{TotcIntEks1(Iter,'ch2')});$$

$$\text{CapcEks2(Iter)} = \text{CapcIntEks2(Iter,'ch1')}\$(\text{TotcEks2(Iter)} \text{ eq } \text{TotcIntEks2(Iter,'ch1')}) + \\ \text{CapcIntEks2(Iter,'ch2')}\$(\text{TotcEks2(Iter)} \text{ eq } \text{TotcIntEks2(Iter,'ch2')});$$

$$\text{CapcEks3(Iter)} = \text{CapcIntEks3(Iter,'ch1')}\$(\text{TotcEks3(Iter)} \text{ eq } \text{TotcIntEks3(Iter,'ch1')}) + \\ \text{CapcIntEks3(Iter,'ch2')}\$(\text{TotcEks3(Iter)} \text{ eq } \text{TotcIntEks3(Iter,'ch2')});$$

$$\text{CapcEnd(Iter)} = \text{CapcIntEnd(Iter,'ch1')}\$(\text{TotcEnd(Iter)} \text{ eq } \text{TotcIntEnd(Iter,'ch1')}) + \\ \text{CapcIntEnd(Iter,'ch2')}\$(\text{TotcEnd(Iter)} \text{ eq } \text{TotcIntEnd(Iter,'ch2')});$$

\*

$$\text{EnergcMFM(Iter)} = \text{EnergcIntMFM(Iter,'ch1')}\$(\text{TotcMFM(Iter)} \text{ eq } \text{TotcIntMFM(Iter,'ch1')}) + \\ \text{EnergcIntMFM(Iter,'ch2')}\$(\text{TotcMFM(Iter)} \text{ eq } \text{TotcIntMFM(Iter,'ch2')});$$

$$\text{EnergcEks1(Iter)} = \text{EnergcIntEks1(Iter,'ch1')}\$(\text{TotcEks1(Iter)} \text{ eq } \text{TotcIntEks1(Iter,'ch1')}) + \\ \text{EnergcIntEks1(Iter,'ch2')}\$(\text{TotcEks1(Iter)} \text{ eq } \text{TotcIntEks1(Iter,'ch2')});$$

$$\text{EnergcEks2(Iter)} = \text{EnergcIntEks2(Iter,'ch1')}\$(\text{TotcEks2(Iter)} \text{ eq } \text{TotcIntEks2(Iter,'ch1')}) + \\ \text{EnergcIntEks2(Iter,'ch2')}\$(\text{TotcEks2(Iter)} \text{ eq } \text{TotcIntEks2(Iter,'ch2')});$$

$$\text{EnergcEks3(Iter)} = \text{EnergcIntEks3(Iter,'ch1')}\$(\text{TotcEks3(Iter)} \text{ eq } \text{TotcIntEks3(Iter,'ch1')}) + \\ \text{EnergcIntEks3(Iter,'ch2')}\$(\text{TotcEks3(Iter)} \text{ eq } \text{TotcIntEks3(Iter,'ch2')});$$

$$\text{EnergcEnd(Iter)} = \text{EnergcIntEnd(Iter,'ch1')}\$(\text{TotcEnd(Iter)} \text{ eq } \text{TotcIntEnd(Iter,'ch1')}) + \\ \text{EnergcIntEnd(Iter,'ch2')}\$(\text{TotcEnd(Iter)} \text{ eq } \text{TotcIntEnd(Iter,'ch2')});$$

\*

$$\text{OthcMFM(Iter)} = \text{OthcIntMFM(Iter,'ch1')}\$(\text{TotcMFM(Iter)} \text{ eq } \text{TotcIntMFM(Iter,'ch1')}) + \\ \text{OthcIntMFM(Iter,'ch2')}\$(\text{TotcMFM(Iter)} \text{ eq } \text{TotcIntMFM(Iter,'ch2')});$$



$$\text{OthcEks1}(\text{Iter}) = \text{OthcIntEks1}(\text{Iter}, 'ch1') \$ (\text{TotcEks1}(\text{Iter}) \text{ eq } \text{TotcIntEks1}(\text{Iter}, 'ch1')) + \\ \text{OthcIntEks1}(\text{Iter}, 'ch2') \$ (\text{TotcEks1}(\text{Iter}) \text{ eq } \text{TotcIntEks1}(\text{Iter}, 'ch2'));$$

$$\text{OthcEks2}(\text{Iter}) = \text{OthcIntEks2}(\text{Iter}, 'ch1') \$ (\text{TotcEks2}(\text{Iter}) \text{ eq } \text{TotcIntEks2}(\text{Iter}, 'ch1')) + \\ \text{OthcIntEks2}(\text{Iter}, 'ch2') \$ (\text{TotcEks2}(\text{Iter}) \text{ eq } \text{TotcIntEks2}(\text{Iter}, 'ch2'));$$

$$\text{OthcEks3}(\text{Iter}) = \text{OthcIntEks3}(\text{Iter}, 'ch1') \$ (\text{TotcEks3}(\text{Iter}) \text{ eq } \text{TotcIntEks3}(\text{Iter}, 'ch1')) + \\ \text{OthcIntEks3}(\text{Iter}, 'ch2') \$ (\text{TotcEks3}(\text{Iter}) \text{ eq } \text{TotcIntEks3}(\text{Iter}, 'ch2'));$$

$$\text{OthcEnd}(\text{Iter}) = \text{OthcIntEnd}(\text{Iter}, 'ch1') \$ (\text{TotcEnd}(\text{Iter}) \text{ eq } \text{TotcIntEnd}(\text{Iter}, 'ch1')) + \\ \text{OthcIntEnd}(\text{Iter}, 'ch2') \$ (\text{TotcEnd}(\text{Iter}) \text{ eq } \text{TotcIntEnd}(\text{Iter}, 'ch2'));$$

\*

$$\text{Resmat}(\text{Iter}, 'ResTCMFM') = \text{TotcMFM}(\text{Iter});$$

$$\text{Resmat}(\text{Iter}, 'ResTCEks1') = \text{TotcEks1}(\text{Iter});$$

$$\text{Resmat}(\text{Iter}, 'ResTCEks2') = \text{TotcEks2}(\text{Iter});$$

$$\text{Resmat}(\text{Iter}, 'ResTCEks3') = \text{TotcEks3}(\text{Iter});$$

$$\text{Resmat}(\text{Iter}, 'ResTCEnd') = \text{TotcEnd}(\text{Iter});$$

$$\text{Resmat}(\text{Iter}, 'ResLMFM') = \text{LabcMFM}(\text{Iter});$$

$$\text{Resmat}(\text{Iter}, 'ResLEks1') = \text{LabcEks1}(\text{Iter});$$

$$\text{Resmat}(\text{Iter}, 'ResLEks2') = \text{LabcEks2}(\text{Iter});$$

$$\text{Resmat}(\text{Iter}, 'ResLEks3') = \text{LabcEks3}(\text{Iter});$$

$$\text{Resmat}(\text{Iter}, 'ResLEnd') = \text{LabcEnd}(\text{Iter});$$

$$\text{Resmat}(\text{Iter}, 'ResKMFM') = \text{CapcMFM}(\text{Iter});$$

$$\text{Resmat}(\text{Iter}, 'ResKEks1') = \text{CapcEks1}(\text{Iter});$$

$$\text{Resmat}(\text{Iter}, 'ResKEks2') = \text{CapcEks2}(\text{Iter});$$

$$\text{Resmat}(\text{Iter}, 'ResKEks3') = \text{CapcEks3}(\text{Iter});$$

$$\text{Resmat}(\text{Iter}, 'ResKEnd') = \text{CapcEnd}(\text{Iter});$$

$$\text{Resmat}(\text{Iter}, 'ResEMFM') = \text{EnergcmFM}(\text{Iter});$$

$$\text{Resmat}(\text{Iter}, 'ResEEks1') = \text{Energceks1}(\text{Iter});$$

Revidert modell til beregning av fergekriteriet i inntektssystemet for fylkeskommunene

Resmat(Iter,'ResEEks2') = EnergcEks2(Iter);

Resmat(Iter,'ResEEks3') = EnergcEks3(Iter);

Resmat(Iter,'ResEEEnd') = EnergcEnd(Iter);

Resmat(Iter,'ResOMFM') = OthcMFM(Iter);

Resmat(Iter,'ResOEks1') = OthcEks1(Iter);

Resmat(Iter,'ResOEks2') = OthcEks2(Iter);

Resmat(Iter,'ResOEks3') = OthcEks3(Iter);

Resmat(Iter,'ResOEnd') = OthcEnd(Iter);

\*Display Resmat;

\*Eksporter

\$libinclude xldump Resmat

C:\Users\klr\Dropbox\GAMSprivat\FERGEKOST\Resultater\Results.xls Resmat a1:cw120

**OBS! Inndelingsskift**



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](http://www.toi.no).

TØI er partner i CIENS Forskningscenter for miljø og samfunn, lokalisert i Forskningsparken nær Universitetet i Oslo (se [www.ciens.no](http://www.ciens.no)). Instituttet deltar aktivt i internasjonalt forskningssamarbeid, med særlig vekt på EUs rammeprogrammer.

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.

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  
Gautstadalléen 21  
0349 Oslo  
Norge

E-post: [toi@toi.no](mailto:toi@toi.no)

**Kontoradresse:**

Forskningsparken  
Gautstadalléen 21.

Telefon: 22 57 38 00

Hjemmeside: [www.toi.no](http://www.toi.no)

