

Henry Haaby Dall
Simon Sætre Karlsen

Taktisk planlegging for effektiv vognallokering: En optimeringsmodell av vognparken til CargoNet

Bacheloroppgave i ingeniørfag, logistikk
Veileder: Steffen J.S. Bakker
Juni 2024

Henry Haaby Dall
Simon Sætre Karlsen

Taktisk planlegging for effektiv vognallokering: En optimeringsmodell av vognparken til CargoNet

Bacheloroppgave i ingeniørfag, logistikk
Veileder: Steffen J.S. Bakker
Juni 2024

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for industriell økonomi og teknologiledelse



Kunnskap for en bedre verden



NTNU

Kunnskap for en bedre verden

DEPARTMENT OF INDUSTRIAL ECONOMICS AND
TECHNOLOGY

TLOG3001 - BACHELOROPPGAVE LOGISTIKK

Taktisk planlegging for effektiv vognallokering: En optimeringsmodell av vognparken til CargoNet

Authors:

Henry Haaby Dall
Simon Sæter Karlsen

Supervisor:

Steffen J.S. Bakker

7. juni 2024

Forord

Denne oppgaven konkluderer vår bachelor i logistikk ved Institutt for industriell økonomi og teknologiledelse ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. Denne oppgaven ble skrevet vårsemesteret 2024, og benytter seg i stor grad av kunnskap ervervet gjennom faget TLOG2009 Optimering av logistikksystemer.

Vi vil gi en spesiell takk til vår veileder Førsteamanuensis Steffen J.S. Bakker for god veiledning og støtte gjennom oppgaven. Vi vil også rette en takk til Michael Granqvist ved CargoNet for en spennende problemstilling og et bærekraftig samarbeid. Avslutningsvis vil vi også gi en spesiell takk til Førstelektor Alireza Ashrafian for engasjement og godt læringsutbytte gjennom hele studieforløpet.

Henry Haaby Dall
Simon Sæter Karlsen

Trondheim, 7. juni 2024

Sammen drag

Denne oppgaven utforsker utviklingen av en optimeringsmodell for effektiv allokering av tomme vogner hos CargoNet, adressert gjennom en taktisk planleggingsmodell. Problemstillingen fokuserer på å redusere antallet overflødige vogner i selskapets vognpark, som medfører økte operasjonelle kostnader. Ved å benytte en matematisk modell og analyser av historiske data, setter oppgaven søkelyset på målsettingen om å forbedre CargoNets driftseffektivitet uten å svekke servicekvaliteten. Hovedresultatene indikerer at ved å implementere den foreslåtte modellen, kan CargoNet oppnå signifikante reduksjoner i antallet overflødige vogner, og dermed redusere kostnader samtidig som de opprettholder en høy servicegrad. Bidragene fra denne forskningen inkluderer en detaljert metodikk for optimering av vognbruk, og viser hvordan teoretiske modeller kan tilpasses til praktiske problemstillinger i jernbanesektoren.

Abstract

This thesis explores the development of an optimization model for the efficient allocation of empty wagons at CargoNet, addressed through a tactical planning model. The problem focuses on reducing the number of surplus wagons in the company's fleet, which incurs increased operational costs. By using a mathematical model and analyses of historical data, the thesis approaches the goal of enhancing CargoNet's operational efficiency without compromising service quality. The main results indicate that by implementing the proposed model, CargoNet can achieve significant reductions in the number of unnecessary wagons, thereby reducing costs while maintaining a high level of service. The contributions of this research include a detailed methodology for optimizing wagon usage in the railway sector, demonstrating how theoretical models can be adapted to practical problems in the railway industry.

Uttrykk og forkortelser

Generelle uttrykk

Node	Et punkt i et nettverk hvor forbindelser møtes eller deles
Bue	En forbindelse mellom to eller flere noder i et nettverk
Nettverk	Et system av sammenkoblede noder og buer som kommuniserer med hverandre
Radiært nettverk	Nettverksstruktur hvor alle noder er koblet til en sentral node
Masket nettverk	Nettverksstruktur hvor hver node er koblet til flere andre noder, som gir flere alternative ruter

Forkortelser

4432	Vogn Lgns 4432
4955	Vogn Sdggmrs 4955
NTP	Nasjonalt Transportplan
TEU	Twenty-foot equivalent unit
FEU	Forty-foot equivalent unit

Terminal-forkortelser

ALN	Alnabru	KIA	Långele
BRG	Bergen	KRS	Kristiansand
DRM	Drammen	MO	Mo i Rana
FAU	Fauske	MSJ	Mosjøen
GAN	Ganddal	NK	Narvik
GSH	Gøteborg Skandihamn	TND	Trondheim
HMD	Heimdal	TRG	Trellebrog

Innhold

Forord	i
Sammendrag	ii
Uttrykk og forkortelser	iv
Figurer	viii
Tabeller	ix
1 Introduksjon	1
2 Bakgrunn	3
2.1 Fordeler og utfordringer med tog og jernbanedrift	3
2.1.1 Fordeler med norsk jernbane	3
2.1.2 Utfordringer med tog- og jernbanedrift i Norge	4
2.2 Jernbane i Norge	5
2.2.1 Det norske jernbanenettet	5
2.2.2 Tog som nasjonalt transportmiddel	7
2.3 Jernbanepolitisk situasjon i Norge	8
2.3.1 Jernbaneforskriften	8
2.3.2 Nasjonal Transportplan	9
2.4 CargoNet	10
3 Litteraturstudie	12

3.1	Litteratursøksstrategi	12
3.2	Planleggingsproblemer	13
3.2.1	Strategisk planlegging	13
3.2.2	Taktisk planlegging	13
3.2.3	Operasjonell planlegging	14
3.2.4	Samspeillet mellom strategisk, taktisk og operasjonell planlegging	14
3.3	Ruteplanlegging for jernbane	15
3.4	Nettverksmodellering	15
3.5	Allokering av vogner	15
4	Tomme vogner problemet	17
4.1	Problembeskrivelse	17
4.1.1	Beslutninger som tas	17
4.1.2	Tilgjengelig informasjon og problemantakelser	18
4.1.3	Mål	18
4.2	Problemeksempel	19
5	Metode	21
5.1	Matematisk modellformulasjon	21
5.2	Implementasjon i Excel	24
5.2.1	Forklaring av optimeringsmodell	24
6	Casestudie	26
6.1	Data og metode	26
6.1.1	Produksjonsplan og historiske data	27
6.1.2	Informasjon om vognpark	28
6.1.3	Dataanalyse	29
6.2	Problembeskrivelse og dagens løsning	29
6.2.1	Variierende etterspørsel på containere	29

6.2.2	Reaktivt og planlagt vedlikehold	31
6.2.3	Infrastruktur	31
6.2.4	Dagens løsning	32
6.3	Valg av optimeringsintervall og -scenario	33
6.3.1	Valg av uker og scenario	33
7	Resultater	36
7.1	Simplex og OpenSolver	36
7.2	Analyse	36
7.2.1	SymmetriskPolicy optimert	37
7.2.2	AsymmetriskPolicy optimert	37
7.2.3	Sammenligning mellom løsningene	38
7.2.4	I hvilke scenarier fungerer det best å sende tomme vogner?	39
8	Diskusjon	41
8.1	Diskusjon	41
8.2	Videre arbeid og forskning	43
8.2.1	Utvidelse og forfining av modellen	43
8.2.2	Implementering av sikkerhetsmarginer	43
8.2.3	Teknologiske investeringer	43
8.2.4	Økt kapasitet på jernbanenettverket	44
8.2.5	Integrert informasjonssystem	44
9	Konklusjon	45
	Bibliografi	47

Figurer

2.1	Kart over det norske jernbanenettet, BaneNOR [a]	6
2.2	Flåmsbana, VisitNorway	6
2.3	Fordeling av innenlandsk godstransport i millioner tonn, 2022	7
2.4	Fordeling av transportarbeid i millioner tonnkilometer i Norge, 2022	8
2.5	Fordeling av midler for norsk jernbane, 2024	9
2.6	Illustrasjonsbilde, CargoNet	10
2.7	Eksempelbilde av Lgns 4432 og Sdggmrs 4955, Birkemo	11
3.1	Oversikt strategisk, taktisk og operasjonelt nivå	14
3.2	Flytskjema tomme vogner Holmberg et al. [1998]	16
4.1	Illustrasjon av et eksempelproblem med allokering av tomme vogner, omlasting, etterspørsel og flyt mellom terminaler	19
5.1	Representasjon av matematisk modell	22
6.1	Stolpediagram vognpark, før optimering	28
6.2	Månedlig etterspørsel TEU 2023	30
6.3	Antall TEU sendt med rute 5507, ALN - BRG, i uke 10 og 26	30
6.4	Gjennomsnittlig antall TEU til og fra Alnabru, 2023	31
6.5	Eksempelsituasjon av togsett opp og ned	32
6.6	Flytskjema modell	34
7.1	Fordeling av vogner i uke 37-38 for forskjellige optimaliseringsscenarier	39

Tabeller

2.1	Antall reisende med jernbane og transportmengde for godstog	7
3.1	Nøkkelord for litteratursøk	12
5.1	Vår modell - Rute 5781	25
5.2	Sendte vogner	25
5.3	Antall vogner hvor, til hvilken tid	25
6.1	Produksjonsplan eksempel	27
6.2	Historiske data eksempel	27
6.3	Årlig kostnad vogn inkludert vedlikehold, fiktive tall	29
6.4	Oversikt over etterspørselsmodeller og variasjonstyper	33
6.5	Modell og optimeringsscenarioer	34
7.1	Vognpark optimert - SymmetriskPolicy	37
7.2	SymmetriskPolicy optimert, kostnadsreduksjon på vognpark i prosent	37
7.3	Vognpark optimert - AsymmetriskPolicy	38
7.4	AsymmetriskPolicy optimert, kostnadsreduksjon på vognpark i prosent	38
7.5	Ytterligere besparelser ved AsymmetriskPolicy i forhold til SymmetriskPolicy	38
7.6	Mulighet for å ikke lease vogner i uke 37-38.	39
7.7	Antall sendinger med tomme vogner uke 12-13 og 14-15, AsymmetriskPolicy	40
7.8	Antall TEU over etterspørsel sendt i uke 12-13 og 14-15, AsymmetriskPolicy	40

Kapittel 1

Introduksjon

I takt med den globale urbaniseringen og økende bekymringer for miljøet, er effektiv og bærekraftig transport en stor utfordring for det 21. århundret. Jernbanetransport, med sin kapasitet til å flytte store volum av passasjerer og gods over lange distanser på en energieffektiv måte, spiller en nøkkelrolle i dette landskapet. Imidlertid, til tross for dens mange fordeler, står jernbanesektoren i Norge overfor utfordringer knyttet til optimalisering av drift og infrastruktur. Disse utfordringene inkluderer, men er ikke begrenset til, ruteplanlegging, nettverksmodellering og allokering av vogner.

Effektivitetsgevinster i disse områdene kan føre til betydelige fordeler, som forbedret tjenestekvalitet, reduserte driftskostnader, økt sikkerhet, og mindre miljøpåvirkning. Videre kan optimering av jernbanesystemer bidra til å møte den økende etterspørselen etter transport, forbedre punktligheten, og øke nettverkets samlede kapasitet. I lys av dette er det i dag et presserende behov for forskning som kan tilby nye innsikter og løsninger for disse komplekse problemstillingene. Dette er områder det allerede er gjort mye forskning på, men det gjør det enda mer interessant å kunne sette anerkjent forskning opp imot resultater fra vår egen oppgave med de fordelene og ulempene det innebærer.

For oss har et tre års bachelorstudie innen logistikk gitt oss en økt interesse for transport og optimalisering. På bakgrunn av dette falt det oss naturlig å skrive en optimeringsoppgave for en norsk bedrift, med et håp om å kunne bidra til en optimalisering for økt effektivitet og redusert sløsing. Med disse inngangsverdiene kom vi i kontakt med CargoNet, et datterselskap i VY konsernet, som er Norges største godstransportør på jernbane.

CargoNet har vært svært behjelpelig med å finne et problemområde for oppgaven. I deres daglige drift anslår CargoNet at de opererer med et vognoverskudd på 30 prosent. De har hatt en følelse av at dette kunne reduseres ved en mer effektiv vognallokering. I samarbeid med CargoNet utarbeidet vi en overordnet problemstilling.

Vår overordnede problemstilling er:

- Hvordan kan CargoNet gjennom allokering av vogner på taktisk nivå, senke antallet vogner

på strategisk nivå, uten at det kompromitterer servicegrad?

For å svare på denne problemstillingen har vi opprettet forskningsspørsmål som skal hjelpe oss.

Våre forskningsspørsmål er:

- Er CargoNets nåværende løsning på vognbruk den mest optimale?
- Hvordan vil fordelingen av de ulike vognene se ut, etter optimering?
- Vil CargoNet tjene på å sende flere vogner enn det etterspørselen tilsier?

For å svare på disse forskningsspørsmålene har vi vært avhengige av å bli bedre kjent med problemfeltet, og har anvendt teori for å få en bredere kunnskap. Vi har på det grunnlaget laget en optimeringsmodell i Excel, som skal gi oss et datagrunnlag vi kan bruke for å reflektere og svare på forskningsspørsmålene. For oss vil dette være allokering av vogner på taktisk nivå, med en intensjon om å redusere vognparken på strategisk nivå.

Denne oppgaven følger en standard disposisjon for en bacheloroppgave. Kapittel 2 går inn på generell info om tog og jernbane i Norge, kort om det politiske aspektet ved jernbane i Norge og avslutningsvis en introduksjon til CargoNet. I Kapittel 3 blir litteratursøket for oppgaven lagt frem og i Kapittel 4 vil en generell beskrivelse av tomme vogner problemet, samt et eksempel gitt. Kapittel 5 viser den matematiske modellformulasjonen og gir en forklaring av optimeringsmodellen. Kapittel 6 er casestudet, hvor dagens problem og løsning blir lagt frem, samt hvordan CargoNet løser dette. Kapittelet viser også optimeringsintervallet for oppgaven. Videre viser Kapittel 7 resultatene våre fra optimeringsmodellen og Kapittel 8 diskuterer disse. Avslutningsvis i 9 kommer vår konklusjon.

Kapittel 2

Bakgrunn

Jernbane er en skinnelagt bane for tog. Et tog består gjerne av et lokomotiv i front som drar vogner etter seg, eller faste togsett som inneholder både et lokomotiv og vogner satt sammen. Jernbanetransport har vært en essensiell og betydningsfull metode for transport av både mennesker og gods, gjennom nærmere to århundrer [Wisting, 2005]. I dette kapitlet vil vi fremlegge fordeler og ulemper ved jernbanedrift, samt gi en fremstilling av den norske jernbanen, både infrastrukturmessig og politisk. Avslutningsvis vil vi gi en innføring i CargoNet som Norges ledende operatør for godstransport på jernbane.

2.1 Fordeler og utfordringer med tog og jernbanedrift

Dette delkapitlet vil drøfte fordelene og ulempene ved tog- og jernbanedrift i Norge. Togtransport er ikke bare energieffektivt, men har også betydelige miljøfordeler på grunn av redusert utslipp sammenliknet med andre transportformer. I tillegg til miljøfordelene, er togtransport også en gods- og energieffektiv transportform. Tog- og jernbanedrift tilbyr en bærekraftig og effektiv løsning for transport av både passasjerer og gods, og spiller en kritisk rolle i den moderne transportinfrastrukturen. Likevel, selv om tog- og jernbanetransport byr på mange fordeler, er det også viktig å fremheve utfordringene knyttet til denne transportformen. Vi vil avslutningsvis belyse de miljøpåvirkning som utbygging av infrastruktur medfører, hvordan togtransport lider under mangel på resiliens og fleksibilitet, og til slutt nevne problematikk knyttet til økonomisk bærekraft.

2.1.1 Fordeler med norsk jernbane

Store deler av den norske jernbanen er elektrifisert, som betyr at togene som kjører med elektrisk kraft istedet for fossilt brennstoff. Elektriske tog har ikke CO_2 -utslipp på samme måte som bil, båt og fly. En studie gjort av Naturvernforbundet viser et anslag på 7 gram CO_2 per kilometer, sammenliknet med en stor bil som er på 71 gram CO_2 per kilometer [Helle, 2019]. Bane NOR sier på sine nettsider at norsk togtransport som fortsatt går på diesel kun utgjør 0,1 prosent av

de totale CO_2 -utslippene fra transport i hele Norge [BaneNOR, b].

Videre har jernbanen høy energieffektivitet. Jernbane kan frakte store mengder gods og passasjerer over lange avstander, på en energieffektiv måte. Sammenliknet med et vogntog vil et godstog kunne frakte et mye større antall containere på ett togsett. Godstoget vil kunne mangedoble antall kilo fraktet, samtidig som det blir gjort elektrisk og uten å belaste veinettet, og bidra til å redusere klimautslipp. Containerskip er den transportformen som kan slå jernbanetransport når det gjelder energibruk og effektivitet, med tanke på det store antall containere det kan frakte.

Avslutningsvis er jernbanetransport også godseffektiv. Et godstog kan frakte flere ulike typer gods på samme togsett. Et lokomotiv kan trekke vogner bestående av containere som frakter tørrvarer, kjølevarer og frysevarer, samtidig som det trekker vogner bestående av industrivarer som tømmer, væske og stein. Dette gjør at togtransport blir ansett som svært godseffektivt.

2.1.2 utfordringer med tog- og jernbanedrift i Norge

For det første, kan utbygging og vedlikehold av jernbanesystemer føre til miljøskader og forstyrrelser i naturen. For å utbedre eller bygge nye jernbanesystemer krever det store inngrep i naturen. Disse inngrepene kan gå på bekostning av naturlige habitater og eksisterende økosystemer. Selve byggeprosessen vil også føre til utslipp og forstyrrelse i naturen.

For det andre, kan man si at togsystemer anses som ikke særlig resiliente. Skader på infrastruktur som skinner, signaler og stasjoner kan forårsake betydelige forstyrrelser i hele nettverket. Det kan gjerne ta lang tid før skadene blir reparert, da det er mange sikkerhetsfaktorer som må oppfylles før transporten går som normalt igjen. Spesielt sårbart er jernbanenettverket for ekstremvær, da disse kan være vanskelig å forutse, samt skape store ødeleggelser. Eksempelvis kan man trekke frem Randklev bru som ble tatt av flom og ødelagt etter ekstremværet Hans i august 2023. Dette førte til at Dovrebanen ble stengt for godstrafikk, som måtte omdirigeres til Rørosbanen i stedet. Broa er tilbake i drift nå, men det har gått på bekostning av både gods- og persontransport.

For det tredje, går mangel på resiliens hånd i hånd med mangel på fleksibilitet, da jernbanetransport anses som lite fleksibelt sammenlignet med andre transportformer. Dette skyldes primært jernbanens avhengighet av faste spor og infrastruktur. Tog kan kun operere langs disse forhåndsbestemte rutene, og er derfor ikke i stand til å omdirigere raskt for å unngå problemer som ulykker, vedlikeholdsarbeid eller naturlige hindringer, på samme måte som veibaserte kjøretøy kan. Denne mangelen på fleksibilitet kan føre til betydelige forsinkelser og forstyrrelser i tjenesten. Videre krever endringer i ruteplanlegging eller kapasitetstilpasninger omfattende planlegging og ofte langvarige infrastrukturprosjekter, noe som begrenser jernbanens evne til å tilpasse seg raske endringer i etterspørsel eller driftsforhold.

For det fjerde, krever bygging, drift og vedlikehold av jernbanesystemer betydelige økonomiske investeringer. Økonomisk bærekraft kan være en utfordring, spesielt i land som Norge, med en utfordrende geografi. De høye kostnadene ved å bygge og vedlikeholde jernbane i fjellrike og mindre befolkede områder øker den økonomiske byrden.

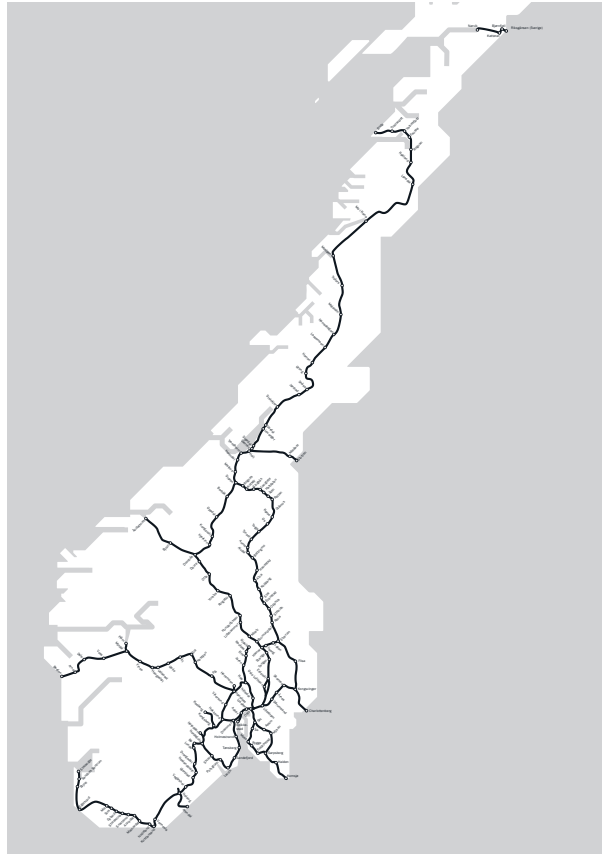
Avslutningsvis står den norske jernbanen overfor flere kapasitets- og infrastrukturutfordringer som påvirker effektiviteten og påliteligheten av togtransporten. Hovedstrekningene som Dovrebanen, Bergensbanen, Sørlandsbanen og Østfoldbanen lider under lange strekninger med kun enkeltspor, noe som fører til flaskehals, forsinkelser og kapasitetsbegrensninger. Disse utfordringene krever omfattende og kostbare investeringer for å kunne løses. I tillegg er viktige linjer som Rørosbanen, Raumabanen og Nordlandsbanen fortsatt ikke elektrifisert, noe som tvinger togoperatører til å fortsette å bruke rullende materiell som drives med fossilt drivstoff. Dette undergraver integrasjonen av det nasjonale jernbanenettet og øker sektorens avhengighet av ikke fornybare drivstoff.

2.2 Jernbane i Norge

Jernbanen i Norge er både omfattende og variert. Dette delkapitlet vil gi en generell forklaring av det norske jernbanenettet, samt trekke inn relevant informasjon om tog som nasjonalt transportmiddel, for både passasjerer og gods. Det vil også bli visualisert modalsplitt og transportarbeid i tonnkilometer for norsk godstransport.

2.2.1 Det norske jernbanenettet

Det norske jernbanenettet er et landstrakt nettverk som strekker seg fra Kristiansand i sør, til Fauske i nord, eller til Narvik via Kiruna i Sverige. Nettverket består av 4196 kilometer med bane, hvor 2456 kilometer av dette igjen er elektrifisert. Av de 4196 kilometerene er det 3900 kilometer med enkeltspor og 296 kilometer med dobbeltspor [Jernbanedirektoratet, 2022]. Det norske jernbanenettet er vist i Figur 2.1.



Figur 2.1: Kart over det norske jernbanenettet, BaneNOR [a]

Jernbanenettet i Norge kan beskrives som både utfordrende og unikt. Jernbanen krysser utfordrende fjellandskap, som krever tunneler, broer og skarpe svinger for å kunne navigere gjennom et terreng med store høydeforskjeller. VisitNorway kaller Flåmsbana en av verdens mest berømte togstrekninger, og i Figur 2.2 kan man se deler av denne.



Figur 2.2: Flåmsbana, VisitNorway

Norge er et langstrakt land, der befolkning bor spredt. Dette betyr at jernbanen må dekke store

avstander for å knytte sammen ulike regioner. Jernbanen må også tåle utfordrende og varierende værforhold, inkludert snø, is, regn og sterk sol. Dette krever robust infrastruktur og tog som er bereget til å operere under tøffe og varierende værforhold.

2.2.2 Tog som nasjonalt transportmiddel

Jernbanen i Norge er et viktig nasjonalt transportmiddel for både passasjerer og gods. Tabell 2.1a viser antall reisende fra 2020 til 2022 på norsk jernbane, mens Tabell 2.1b viser transportmengde for godstog i Norge fra 2020 til 2022. Tallene er hentet fra Jernbanedirektoratet [2022].

Tabell 2.1: Antall reisende med jernbane og transportmengde for godstog

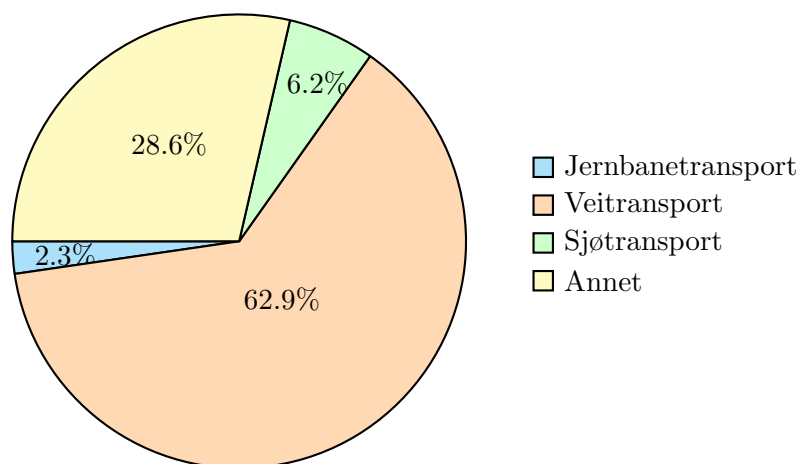
År	Antall reisende
2020	42,599,000
2021	41,401,000
2022	66,695,000

(a) Antall reisende med jernbane

År	Tonn
2020	36,822,000
2021	37,550,000
2022	33,496,000

(b) Transportmengde for godstog i tonn

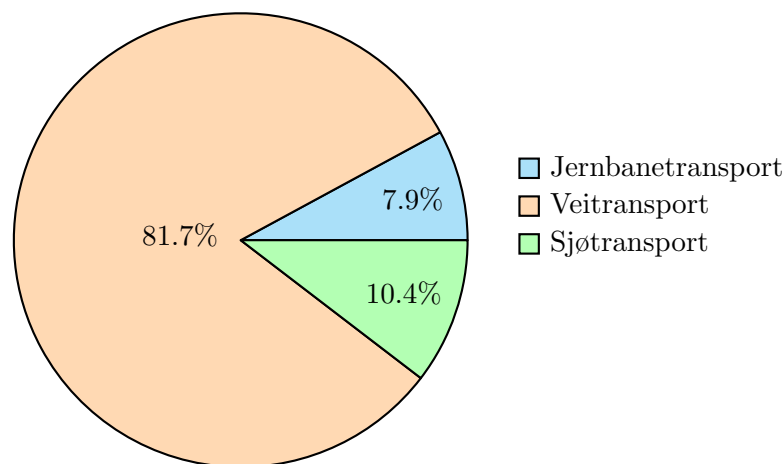
Videre viser Figur 2.3 modalfordelingen for innenlands godstransport i millioner av tonn for 2022. Vi ser her at veitransporten har absolutt størst andel, på nærmere 63 prosent av all godstransport i Norge. Jernbanetransporten derimot er på lave 2.3 prosent. Det er flere faktorer som spiller inn på denne lave prosentandelen, men mest relevant for denne oppgaven er kapasitetsbegrensningene. Gitt begrenset kapasitet, er transportoperatørene nødt til å være effektive.



Figur 2.3: Fordeling av innenlandsk godstransport i millioner tonn, 2022

Figur 2.4 viser fordelingen mellom transportarbeid i millioner tonnkilometer i Norge, i 2022. Selv om det er en høyere prosent sammenliknet med Figur 2.3, er fortsatt jernbanetransport underlegen veitransport. En ville tro at i et langstrakt land som Norge, så burde prosentandelen vært høyere, men som Figuren viser er det veitransport som fortsatt er den absolutt mest

benyttede transportformen for gods her i landet per 2022. Tallene for begge modalsplittene er hentet fra SSB [2022].



Figur 2.4: Fordeling av transportarbeid i millioner tonnkilometer i Norge, 2022

2.3 Jernbanepolitisk situasjon i Norge

Bane NOR er i dag det statelige foretaket som er infrastrukturforvalter for det nasjonale jernbanenettet. Bane NOR er ansvarlig for blant annet vedlikehold, utbygging og drift av jernbanen, stasjonene, terminalene og andre relaterte anlegg. Over seg har Bane NOR Jernbanedirektoratet, som fungerer som et fagorgan med et nasjonalt koordineringsansvar for å samordne jernbanesektoren. Til slutt er det Samferdselsdepartementet som er høyeste instans, med hovedansvar for å sette de langsiktige målene og den strategiske retningen, innenfor lover og rammer fastsatt av Stortinget. Som transportør må man forholde seg til politiske vedtak og forskrifter, og i dette delkapitlet vil det bli gitt en kort innføring i Jernbaneforskriften og Nasjonal Transportplan, som begge ligger til grunn for at det skal kunne drives jernbanetransport i Norge.

2.3.1 Jernbaneforskriften

Jernbaneforskriften er et regelverk som omhandler sikkerhet, drift og vedlikehold av det norske jernbanesystemet. Særlig relevant for denne oppgaven er regelverket for ruteleie og ruteplanlegging, som togoperatørene må forholde seg til når de skal utarbeide ruteplaner. Prosessen med å utarbeide ny ruteplan tar ca. 1 år fra den er påbegynt, til den blir iverksatt. Eksempelvis ble prosessen med å utarbeide ruteplanen for 2025 startet desember 2023, og trer i kraft desember 2024. Samtidig er det pågående møter, søknader og høringer for at rutenplanene til de forskjellige togaktørene skal gå opp. Endringer som små justeringer på avgang- og ankomsttider kan normalt gjøres i denne planleggingen, men ved større endringer må dette planlegges og avklares med Bane NOR ca. 3 år i forveien.

Togoperatørene må videre forholde seg til prioriteringskriteriene som står i Jernbaneforskriften.

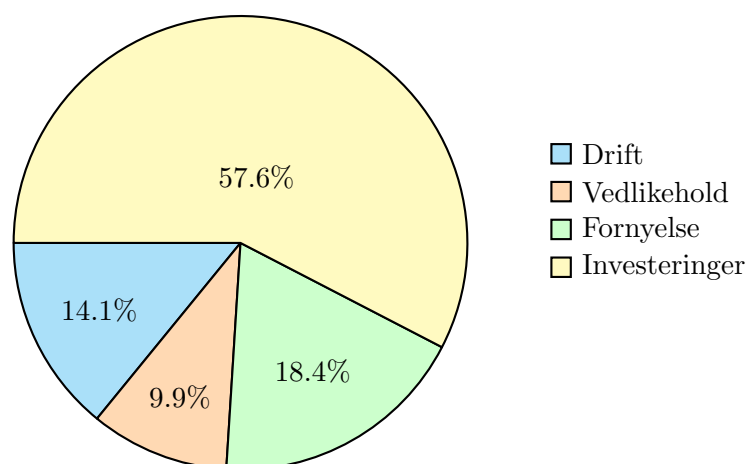
Ved utarbeiding av ruteplaner, spesielt ved store endringer, så er det prioriteringskriteriene som gjelder. I lista nedenfor ser man de ulike prioriteringene, i synkende rekkefølge. Prioriteringskriteriene er hentet fra Lovdata [2021].

1. tjenester som inngår i kontrakt med staten om offentlig tjenesteyting
2. nasjonal og internasjonal godstransport
3. bestemte typer trafikk på strekninger som nevnt i § 8-8 annet ledd
4. persontransport for øvrig
5. vedlikeholdsarbeider

I praksis betyr dette at hvis en godstogoperatør søker om en omfattende endring i ruteplanen, og den kommer i konflikt med et persontog som inngår i punkt 1, så taper godstogoperatøren. Godstogoperatøren vil da få forslag om en annen rutetid som kan benyttes. Knyttet til prioriteringslisten følger det en usikkerhet ved store endringer i ruteplanen, ettersom utfallet kan bli anderledes enn ønsket.

2.3.2 Nasjonal Transportplan

Nasjonal Transportplan er en stortingsmelding som presenterer regjeringens transportpolitikk og beskriver hvilke målsettinger, virkemidler og prinsipper regjeringen legger til grunn for sine prioriteringer [Solvoll, 2005]. Bane NOR på sine nettsider sier at bare i 2024 skal det investeres 28 milliarder kroner i drift, vedlikehold og fornyelse av jernbane [BaneNOR, 2024a]. Pengene fordeler seg som vist i Figur 2.5.



Figur 2.5: Fordeling av midler for norsk jernbane, 2024

Det kommer frem av Nasjonal Transportplan at i årene 2025-2036 er det klare politiske ambisjonen at mer godstrafikk skal flyttes fra vei til bane. Dette vil gjøres ved å bygge nye dobbeltspor

mellom Arna og Stanghelle, Råde og Fredrikstad og Åkersvika og Hamar. Det er også planlagt utbedring av godsterminal i Trondheimsområdet, samt økning i kapasitet på Alnabru godsterminal i Oslo [Samferdsesdepartementet, 2024]. Dette er i tillegg til pågående prosjekter som dobbeltspor mellom Oslo og Tønsberg, samt elektrifisering av Trønder- og Meråkerbanen. Totalt sett kommer det frem i NTP at Regjeringen legger opp til å øke det gjennomsnittlig drift og vedlikeholdsbudsjett fra 4,9 milliarder til 6,75 milliarder, en økning på omtrent 38 prosent [BaneNOR, 2024b].

2.4 CargoNet

CargoNet er Norges ledende operatør for godstransport på jernbane. Firmaet tilbyr faste transporter mellom de store byene i Sør-Norge og til og fra Nord-Norge, i tillegg til Sverige og noe i Danmark og Tyskland. I 2022 hadde firmaet en markedsandel på 65 prosent, med velkjente kunder som Bring, Schenker, DHL og DSV CargoNet [2024]. CargoNet er et selskap i VY-konsernet, som i hovedsak betyr at det er heleid av den norske stat. CargoNet drifter også terminaler, og per i dag er det 11 terminaler her i Norge. Disse strekker seg fra Kristiansand i sør til Narvik i nord, via Kiruna i Sverige. For denne oppgaven er det hovedsakelig virksomheten i Norge og Sverige som blir prioritert, da Danmark og Tyskland står for en mindre del av transporten. Figur 2.6 viser et togsett som frakter gods på en strekning i Norge.



Figur 2.6: Illustrasjonsbilde, CargoNet

CargoNet har som mål å tilby effektive og miljøvennlige transportløsninger. De spiller en kritisk rolle i den nasjonale logistikkjeden ved å koble sammen de største byene i Norge. CargoNet tilbyr et bredt spekter av transportløsninger på jernbane, med alt fra dagligvarer til industriprodukter, noe som understreker deres betydning for en bærekraftig transport.

Kjøretøyflåten til CargoNet består av flere ulike lokomotiver og vogner, hvor majoriteten er eid av selskapet. For frakting av containere benytter firmaet seg av to typer vogner. Den ene

typen heter Lgns 4432, som vist i Figur 2.7a, heretter referert til som "4432". Det er en toakslet containervogn som kan frakte 2xTEU. Den andre vognen Sdggmrs 4955, som vist i Figur 2.7b, heretter referert til som "4955", er en seksakslet megavogn som kan frakte 4xTEU, eller 2xFEU. Utover de eide vognene leaser CargoNet også vogner fra eksterne selskaper. CargoNet har også tre ulike typer systemvogner som kan frakte tømmer, større industrienheter og drivstoff. I denne oppgaven tar vi ikke hensyn til de tre sistnevnte vognene, da de ikke inngår i problemstillingen vi skal se på.



(a) Eksempelbilde av Lgns 4432



(b) Eksempelbilde av Sdggmrs 4955

Figur 2.7: Eksempelbilde av Lgns 4432 og Sdggmrs 4955, Birkemo

Avslutningsvis planlegger CargoNet transporten sin i det de kaller en produksjonsplan. Produksjonsplanen viser hvilke ruter CargoNet opererer med. Disse rutene er da oppført med startsted og endested, avgangstid og ankomsttid, og hvilke dager i uken denne strekningen går. Hver rute har da sitt eget tognummer, med en forventet etterspørsel på antall vogner togsettet skal ha. Restriksjoner for maksimal lengde og vekt på togsettet, er også med i produksjonsplanen. For denne oppgaven er produksjonsplanen en essensiell datakilde for utviklingen av modellen vår.

Kapittel 3

Litteraturstudie

Formålet med dette litteraturstudiet er tredelt: For det første, å gi en oversikt over eksisterende forskning og metoder relatert til planlegging av godstransport på jernbane. Dette inkluderer planlegging på strategisk, taktisk og operasjonelt nivå. For det andre, med hjelp fra eksisterende forskning finne strategier for ruteplanlegging, tidsplanlegging og effektiv allokering av vogner. Til slutt, strebe etter å samle og frembringe relevant litteratur for å danne et solid grunnlag for oppgaven vår. Dette vil ikke bare bidra til akademisk kunnskap, men også gi praktiske innsikt som kan anvendes under modellutvikling og utforming av selve oppgaven.

3.1 Litteratursøksstrategi

Vår litteratursøksstrategi involverer en kombinasjon av målrettede søk på Google Scholar, bruk av nøkkelord for å finne relevante artikler, og gjennomgang av referansene i disse artiklene for videre lesning. Denne metoden starter med å definere og benytte spesifikke nøkkelord relatert til forskningstemaet. Nøkkelord vi benytter oss av er vist i Tabell 3.1.

Nøkkelord og begreper	
Freight transportation	Rail transportation
Operations research	Road transportation
Planning	Rail freight carriage
Operations	Optimization
Models	Allocation
Method	Transportation
Tactical planning	Planning
Freight transportation	Allocation of wagons

Tabell 3.1: Nøkkelord for litteratursøk

Vi har valgt å benytte oss av Google Scholar, en plattform som gir tilgang til et bredt utvalg av akademiske tekster, inkludert journalartikler og bøker. Ved å bruke nøkkelord får vi raskt

identifisert de artiklene som er mest relevante for våre spesifikke forskningsspørsmål. Ved å benytte seg av forskningsartikler i anerkjente journaler, som *Transportation Science* og *European Journal of Operational Research* vil man få gode og faglige artikler som kvalitetssikrer oppgaven. I tillegg er disse artiklene med på å bygge et solid kunnskapsgrunnlag for oss. Videre, ved å undersøke referanselistene til disse artiklene, kan vi oppdage ytterligere verdifulle kilder som kanskje ikke dukket opp i det opprinnelige søket.

3.2 Planleggingsproblemer

Planleggingsproblemer innen jernbanesystemer kan kategoriseres basert på deres tidshorisont og detaljeringsnivå, i strategiske, taktiske, og operasjonelle planleggingsnivåer. Liebchen & Rolf [2007] sier i sin forskning at fra strategisk nivå ned til operasjonell planlegging er de viktigste deloppgavene nettverksplanlegging, ruteplanlegging, kjøretøyplanlegging og mannskapsplanlegging. Lusby et al. [2017] bygger videre på dette, og legger vekt på at planleggingsproblemer for jernbane strekker seg fra langsiktige strategiske valg, ned til kortsiktige valg på operasjonelt nivå. Totalt bidrar denne inndelingen til en mer strukturert tilnærming til kompleksiteten og mangfoldet av utfordringer i jernbanesektoren, og understreker behovet for forskjellige metoder og modeller på hvert nivå. Vi vil nå forklare nærmere de ulike nivående for planlegging.

3.2.1 Strategisk planlegging

Strategisk planlegging fokuserer på langsiktige beslutninger som har en varighet på flere år til tiår. Strategisk planlegging er det høyeste nivået for beslutningstaking, involverer store investeringer og former strategien for systemet [Crainic & Roy, 1988]. Dette kan være utbygging av infrastruktur, som bygging av nye jernbanelinjer, stasjoner, og vedlikeholdsfasiliteter, samt beslutninger om kjøp av rullende materiell og investeringer i teknologi. På dette nivået er målet å forme fremtidens jernbanenettverk, for å møte antatte endringer i etterspørsel og samfunnsmessige behov. Analyser på strategisk nivå krever en helhetlig tilnærming til transportplanlegging, som ofte involverer scenarioanalyse og større samfunnsøkonomiske vurderinger.

3.2.2 Taktisk planlegging

Taktisk planlegging har en mellomlang tidshorisont, vanligvis fra måneder til år. Crainic & Laporte [1997] beskriver prosessen som en effektiv og rasjonell allokering og optimering av eksisterende ressurser, for å forbedre den totale ytelsen til systemet. De sier videre at valg som inngår i designet av servicenettverket klassifiserer planleggingen. Dette er valg som ruteplanlegging med eksisterende ressurser og infrastruktur, driftsregler og arbeidsfordeling mellom terminaler, og til slutt posisjonering av materiell. Sistnevnte kan for eksempel være tomme vogner. Taktisk planlegging tar også for seg personalplanlegging, inkludert opplæring og skiftplaner. Metoder som brukes på dette nivået inkluderer ofte simulering, optimering og operasjonsana-

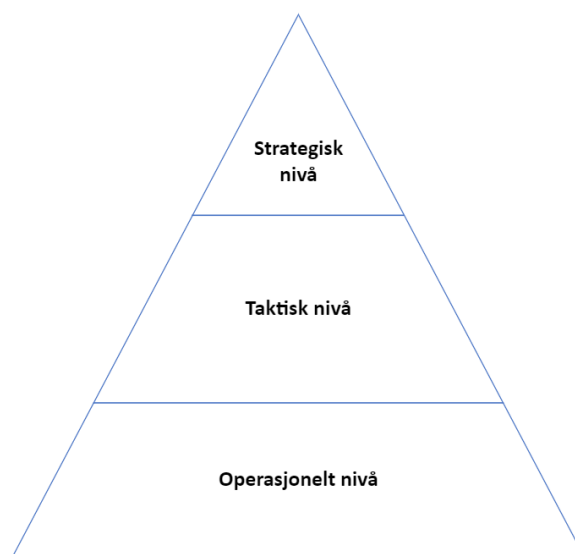
lytiske modeller, for å kunne vurdere ulike strategier for ressursbruk og deres påvirkning på nettverkseffektiviteten.

3.2.3 Operasjonell planlegging

Operasjonell planlegging adresserer de daglige og kortsiktige aspektene ved å drive et jernbanesystem, med en tidshorison fra dager til uker. Beslutningene blir ofte utført på lokalt nivå, av for eksempel togledere og teknikere. Beslutningene må også kunne tas hurtig, som følger av et dynamisk miljø hvor tidsbruk er en viktig faktor [Crainic & Laporte, 1997]. Videre er planlegging av tjenester som disponering av kjøretøy, vedlikeholdsarbeid, personalallokering og håndtering av uforutsette hendelser planlagt på et operasjonelt nivå [Crainic & Roy, 1988]. På dette nivået er det viktig å ha effektive systemer for beslutningsstøtte og sanntidsinformasjon for å kunne gjøre raske justeringer. Operasjonell planlegging krever høy grad av fleksibilitet og reaktivitet, og krever ofte avanserte teknologier som kunstig intelligens og maskinlæring for å optimalisere beslutninger i sanntid.

3.2.4 Samspillet mellom strategisk, taktisk og operasjonell planlegging

Samspillet mellom de strategiske, taktiske, og operasjonelle planleggingsnivåene er avgjørende for en helhetlig og effektiv drift av jernbanesystemer. Ved å anerkjenne spesifisiteten og de unike utfordringene på hvert planleggingsnivå, kan jernbanesektoren bedre adressere komplekse beslutningsprosesser og sikre en bærekraftig og effektiv transporttjeneste. Samarbeid på tvers av planleggingsnivåer, både oppstrøms og nedstrøms, sikrer at langtidsvisjoner harmoniseres med de daglige operasjonelle realitetene, og bidrar til å realisere det fulle potensialet av jernbanetransport som en nøkkelfaktor i et bærekraftig mobilitetssystem. Figur 3.1 er en visualisering av de overnevnte strategiene.



Figur 3.1: Oversikt strategisk, taktisk og operasjonelt nivå

3.3 Ruteplanlegging for jernbane

Ruteplanlegging innen jernbane refererer til prosessen med å planlegge og optimalisere togrutene. Dette innebærer å fastsette hvilke stasjoner togene skal stoppe ved, hvilken rute de skal ta for å komme dit, og hvilke tidspunkter de skal kjøre på. Å planlegge tog i et jernbanenettverk er kjent for å være utfordrende, på grunn av alle konfliktene som kan oppstå [Garrisi & Cervelló-Pastor, 2019]. Ruteplanlegging i seg selv gjøres ved å lage en tidstabell, hvor ankomst og avgang for hvert tog, på ulike steder i nettverket vises. Utfordringene oppstår gjerne når ulike tog ønsker å kjøre på samme strekning, til samme tidspunkt. Spesielt krevende blir det når buene består av enkeltspor [Oliveira & Smith, 2000].

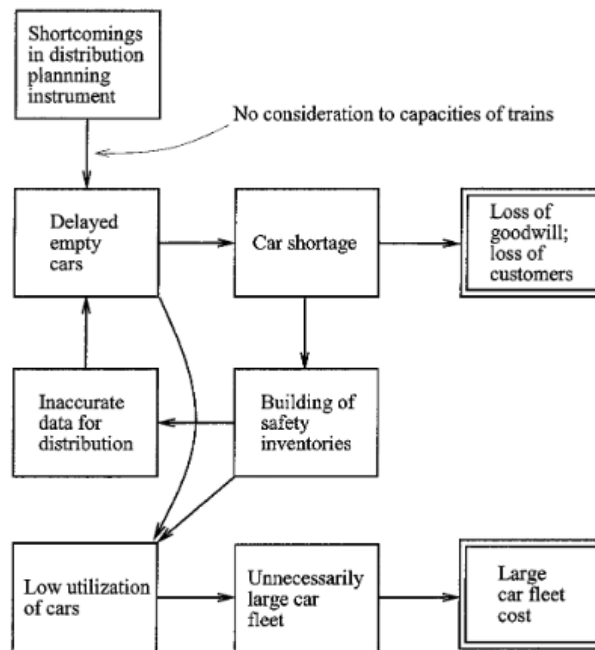
3.4 Nettverksmodellering

Nettverksmodellering for jernbane er en tilnærming som brukes til å analysere og forstå de komplekse relasjonene og strukturene som finnes i jernbanesystemer, og hvordan de henger sammen. Dette innebærer å presentere jernbanenettverket som et nettverk av noder, og infrastruktur som forbinder nodene. Det er gjort mye forskning på dette feltet. For eksempel analyserer og vurderer Cornaro & Frechi [2023] jernbanenettverk etter robusthet, mens Xin [2022] går nærmere inn på nettverksdesign og lineær programmering for jernbane. Lu & Wang [2022] lager en modell som viser en virtuell optimal rute mellom ulike transportnettverk. Fellesnevneren for mange av forskningsartikler er at nettverksmodellering for jernbane er tett knyttet sammen med optimering for kostnadsreduksjon og økt effektivisering og utnyttelsesgrad.

3.5 Allokering av vogner

Allokering av vogner innen jernbane refererer til prosessen med å tildele vogner til forskjellige togsett for å oppfylle transportbehovene effektivt. Dette innebærer å bestemme hvilke vogner som skal inngå i hvert togsett, basert på faktorer som reisetid, etterspørsel og tilgjengelighet av vogner. Cordeau et al. [1998] beskriver prosessen godt, ved at syklusen for allokering starter når det blir utstedt etterspørsel for tomme vogner. Videre forklarer de prosessen med hvordan vogner blir valgt på terminalen og flyttet til riktig plass, hvor de så vil bli lastet. Etter lasting blir vognene sortert i blokker og satt på utgående tog. Når toget ankommer endelig destinasjon blir det losset, og med mindre mottaker har videre bruk for vognene, blir de returnert og syklusen kan starte på ny. I samme artikkel skriver forfatterne at vognene reiser ofte tomme, fra oppdrag til oppdrag. Haghani [1987] skriver at vogner tilbringer opp til 70 prosent av tiden enten stillestående på terminal, eller at de transporteres tomme på jernbanen. Den høye ineffektiviteten resulterer i et høyt antall eide vogner. En høyere utnyttelsesgrad og effektivisering av vogner, vil dermed kunne lede til reduksjon av vogner, som igjen leder til mindre kapital bundet opp i utstyr. For denne oppgaven har vi spesielt tatt inspirasjon fra Holmberg et al. [1998] som har utviklet en optimeringsmodell for tomme vogner. Modellen tar utgangspunkt

i multivare nettverksflytproblemet (Multi-commodity flow problem), med heltallbegrensninger for å optimalisere vognbruken. Forskningsartikkelen visualiserer også problemstillingen meget godt med et flytskjema, som vist i Figur 3.2.



Figur 3.2: Flytskjema tomme vogner Holmberg et al. [1998]

Problemstillingen denne artikkelen adresserer ligner på vår, der CargoNet også opplever uønskede høye flåtekostnader på grunn av en stor vognpark. Artikkelen konkluderer med at deres modell fungerte, og at de lyktes med å forbedre kvaliteten på prosessen for distribusjon av tomme vogner. Dette er interessant informasjon vi vil ta med oss i oppgaven vår.

Kapittel 4

Tomme vogner problemet

Dette kapitlet tar for seg hovedtrekkene i tomme vogner problemet. Dette er vår variasjon av det mer generelle fordeling av tomme vogner-problemet, som ble beskrevet i Delkapittel 3.5. Dette kan i stor grad trekkes sammenlikninger mellom dette problemet, og de utfordringene CargoNet står ovenfor i dag. Vi vil først beskrive problemet, og deretter vise ett eksempel for å demonstrere problematikken.

4.1 Problembeskrivelse

Integrert i et jernbanenettverk finner man terminaler som kan oppbevare og allokere vogner. Vognene er ofte spredd utover i nettverket for å redusere risiko og skape bedre flyt. Problemet oppstår når etterspørselen etter vogner ikke er lik mellom alle terminalene, og terminaler ender opp med enten overskudd eller underskudd på vogner. Spesielt utfordrende blir dette når nettverket er radiallyt og ikke masket, slik at togsettene må reise hele strekningen for så å vende tilbake til utgangspunktet. Det byr også på ytterligere utfordringer når nettverket består av enkeltspor, slik at krysningene med andre tog må forekomme på spesifikke steder. Resultatet av dette kan være at transportør operer med et overskudd på antall vogn i vognparken, slik at de unngår situasjoner hvor det er mangel på vogner.

4.1.1 Beslutninger som tas

For at vognene skal tilnærme seg en mer optimal fordeling mellom terminalene, må transportøren ta ulike valg rundt hvordan fordelingen skal foregå. Generelt vil disse være med på å skape en bedre utnyttelse av vognparken, da en uniform fordeling mellom terminalene ikke nødvendigvis er den beste. Valgene rundt vognparken og dens utnyttelse er på strategisk, taktisk og operasjonelt nivå, noe som gjør prosessen mer utfordrende. For å utnytte vognparken best mulig, mener vi dette er de tre mest sentrale valgene:

1. Hvilke vogntyper, og hvor mange av hver vogntype, selskapet skal ha (strategisk)

-
2. Antall vogner av hver vogntype, hver terminal skal ha, til en hver tid (taktisk)
 3. Hvilke vogntyper, og hvor mange av hver vogntype, skal sendes på rutene for å etterkomme etterspørselen (taktisk)

Gode beslutninger rundt disse valgene, er med på å optimaliser vognparken og bruken av den.

4.1.2 Tilgjengelig informasjon og problemantakelser

Innkjøp, vedlikeholdsplaner og personellallokering er avgjørelser på strategisk og operasjonelt nivå, og er ikke en del av omfanget til denne oppgaven. Vi antar dermed at det alltid er tilstrekkelig med lokomotiv og vogn, og at disse fungerer med tanke på vedlikehold. Beslutningen rundt hvor mange vogner selskapet skal ha, er en avgjørelser på strategisk nivå. Vi kommer ikke til å gå inn på selve innkjøpsdelen, men legge frem et forslag om en eventuell reduksjon av total antall vogner. Videre antar vi at det alltid er nok tilgjengelig arbeidskapasitet til å drifte terminalene. Selv om ruteplanlegging er beslutninger på taktisk nivå, vil ikke oppgaven dekke dette, da ruteplanlegging omfatter større byråkratiske og politiske beslutninger, som adressert i Underkapittel 2.3.1. Selv om utarbeidelsen av en ruteplan ikke er i omfanget til oppgaven, er likevel selve konseptet med ruteplan essensielt, da vi jobber ut ifra CargoNet sin ruteplan for 2024.

Problemet tar for seg et bestemt antall terminaler i nettverket, som ikke kan endres under planleggingsperioden. Det er også bare vognene 4432 og 4955 som vil bli brukt. Strekningene og tidsavgangene på togene kan ikke endres, og hver av strekningene har en fast tidsbruk man må forholde seg til, ergo forsinkelser eksisterer ikke. Rutene som er satt opp kan også kjøres selv om det ikke er etterspørsel på ruten. Grunnen til at vi løser det på denne måten er fordi det skal være så virkelighetsnært produksjonsplanen til CargoNet som mulig. Det påløper også omstillingstid på terminal der det er relevant.

Problemløsningen vil bli begrenset av lengden på togsettet, da togsett har en maks begrensnings på lengde. Det skal likevel nevnes at denne kan overstiges i visse tilfeller, men da med restriksjoner på at togsettet ikke kan inneholde tomme vogner. Begrensninger som trekraft og vekt vil bli neglisjert, da vekten på togsettet blir begrenset av de korte lengdene på togetsettene som kan kjøres i Norge.

En siste relevant faktor for å løse fordelingsproblemet er etterspørsel på TEU. Både vogn 4432 og vogn 4955 frakter containere, og det er etterspørselen på TEU som styrer hvor mange vogner som trengs. Ved bruk av historiske data og gitt produksjonsplan, får vi en oversikt over historisk etterspørsel.

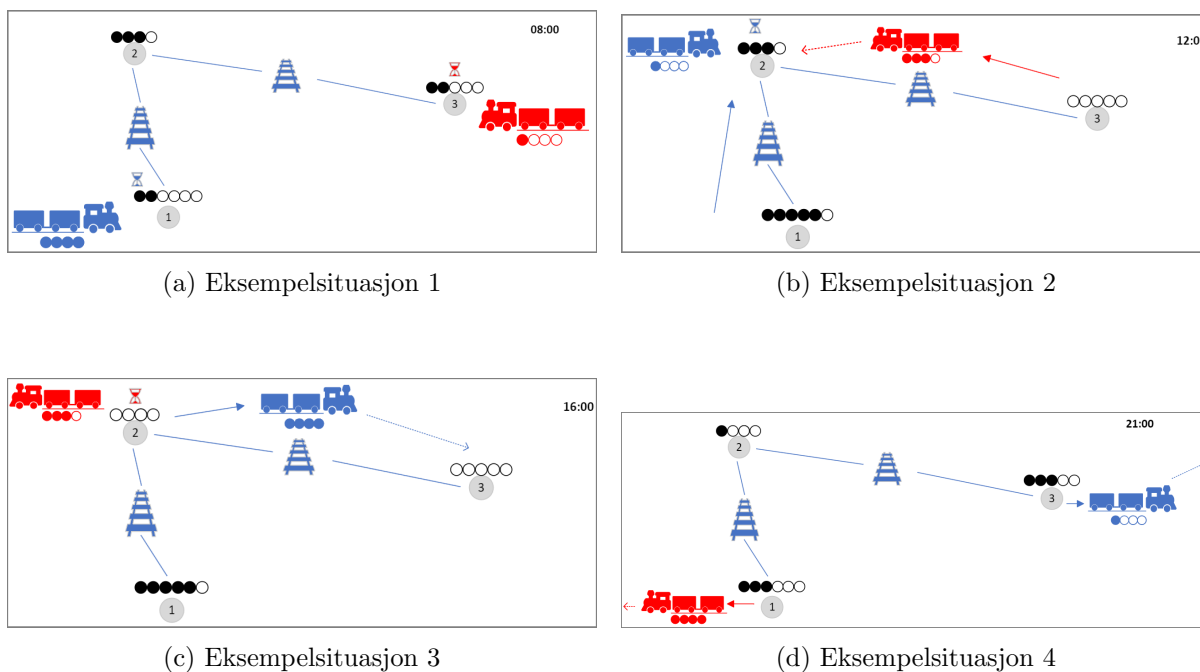
4.1.3 Mål

Ved å benytte seg av den informasjonen er tilgjengelig, skal transportør kunne maksimere utnyttelsen av vognparken, og med andre ord, minimere overflødig vogn for å på sikt kunne redusere

vognparken. En viktig faktor er at dette ikke skal kompromittere servicegraden.

4.2 Probleme eksempel

Figur 4.1 illustrerer et eksempel på tommevogn-problemet over en tidshorisont på en dag. Dette er en forenkelt modell av hvordan et jernbanenettverk kan se ut. Figuren viser steg for steg hvordan prosessen med allokering av vogner, omlast og flyt mellom terminaler fungerer. Allokeringen blir styrt av en kjent etterspørsel. Sirklene med nummer representerer terminalene, hvor avstanden mellom Stasjon 1 og Stasjon 2 er kortere enn avstanden mellom Stasjon 2 og Stasjon 3. Grunnet det radiære nettverket er det ikke mulig å bevege seg direkte fra Stasjon 1 til Stasjon 3. De små sorte sirklene over hvert stasjonsnummer representerer kapasiteten til stasjonen. Kapasiteten til Stasjon 1 er på seks, kapasiteten til Stasjon 2 er på fire og kapasiteten til Stasjon 3 er på fem. Dette skal visualisere at ulike terminaler operer med ulike kapasiteter. Fylt sirkel betyr at det er vogn på terminalen, hul sirkel betyr plass til vogn. Det samme gjelder for lokomotivene som har en gitt kapasitet. Begge lokomotivene har samme kapasitet, og i dette eksempelet skilles det ikke mellom ulike typer vogn da dette er en forenkelt fremstilling av problemet. Vi skiller mellom Lokomotiv Blå og Lokomotiv Rød. Timeglasset lokalisert over terminalene indikerer omstillingstid, med fargen blå eller rød som indikerer hvilket lokomotiv som laster. Heltrukket og stiptet pil indikerer reiserute. Den heltrukken viser hvor togsettet har reist fra, og den stiplede linjen viser hvor togsettet er på vei til. Øverst i høyre hjørne vises det tidspunkt.



Figur 4.1: Illustrasjon av et eksempelproblem med allokering av tomme vogner, omlasting, etterspørsel og flyt mellom terminaler

I Figur 4.1a ser vi en oversikt over nettverket ved tidspunkt 08.00. På Terminal 1 omstilles

Lokomotiv Blå og på Terminal 3 omstilles Lokomotiv Rød. På Terminal 2 er det ingen aktivitet, men vi ser den har tre vogn på terminal. Lokomotiv Blå er på full kapasitet, mens Stasjon 2 har to av seks vogn på terminal. Lokomotiv Rød omstilles med en vogn i togsettet, mens Terminal 3 har to av fem vogn på terminal.

I Figur 4.1b er omstillingsprosessene ferdige og togsettene har beveget på seg. Dette er da ved tidspunkt 12:00. Lokomotiv Blå har beveget seg til Terminal 2 med én vogn, og står og omlastes. Det viser at Lokomotiv Blå har etterlatt seg tre vogn på Terminal 1. Lokomotiv Rød er på vei mellom Terminal 3 og Terminal 2 med tre vogner, som indikerer at Lokomotiv Rød har lastet med seg to vogn fra Terminal 3.

I Figur 4.1c har Lokomotiv Rød ankommet Terminal 2 og omlastes, fire timer etter b. Lokomotiv Blå er på vei med fire vogner til Terminal 3, som indikerer at den lastet med seg alle vognene som stod på Terminal 2.

Til slutt, i Figur 4.1d har begge togsettene kjørt forbi Terminal 1 og 3 med nye antall vogner, som indikerer at de har stoppet og omlastet på Terminal 1 og 3, før de kjører videre.

Oppsummert ser vi at togsettene både setter fra seg og tar med seg vogner fra terminalene de stopper på. De kjører ikke med et fast togsett, uavhengig av hvor mange eller få vogn det står på hver terminal. I dette eksemplet kan vi se at balanseringen på allokering av vogner fungerer ved god planlegging.

Kapittel 5

Metode

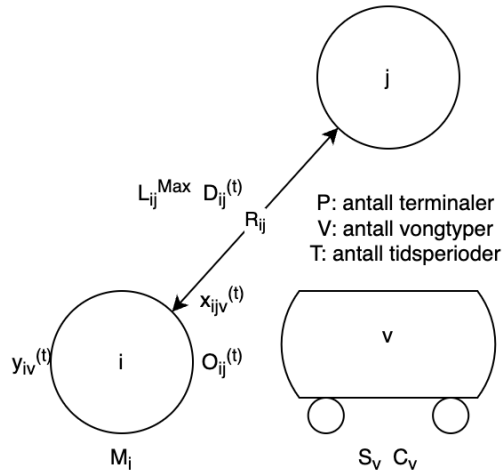
I dette kapitlet skal vi gå dypere i modellen vi har utviklet for å løse tommevogn-problemet. Vi vil først vise den matematiske formulasjonen, som beskriver matematisk hvordan optimeringsmodellen vår fungerer. Deretter vil det bli gitt en forklaring på optimeringsmodellen i Excel, da Excel er verktøyet vi bruker for å gjennomføre optimeringen. Avslutningsvis vil vi gi en forklaring på de ulike scenarioene vi skal optimere.

5.1 Matematisk modellformulasjon

Det underliggende transportnettverket modelleres som et nodenettverk. En abstrakt representasjon av nettverket er gitt i Figur 5.1. Her representerer P antall noder som representerer terminalområder, V representerer antall vogntyper, mens en rett bue (i, j) representerer transportforbindelsen fra node i til node j , hvor $i, j \in \{1, \dots, P\}$. Transportforbindelsene i nettverket inkluderer eksisterende togruter mellom terminalene, der togene går på fastsatte tidspunkter i henhold til en produksjonsplan. Hver strekning er begrenset av maksimal toglangde og etterspørsel av containere, som varierer fra rute til rute.

For å imøtekomme etterspørselen mellom terminalene, kan det benyttes forskjellige vogntyper med ulik containerkapasitet og lengde. Målet med modellen er å optimalisere startantallet av de ulike vogntypene ved hver terminal. Det som har innvirkning på optimal mengde vogner, er antallet og hvilke vogntyper som er benyttet for å dekke etterspørselen mellom de ulike terminalene. Det er også muligheten for å sende tomme vogner mellom terminalene, for å utnytte vognene bedre og redusere det totale antallet vogner i nettverket.

Modellen vil minimere det totale antallet vogner ved å bruke nettverksflytteori for å koble sammen terminalene og optimere vognflyten. Dette vil gjøres ved å vurdere eksisterende begrensninger, som maksimal lengde på toget for hver strekning og maksimal lagringskapasitet av vogner på hver terminal.



Figur 5.1: Representasjon av matematisk modell

Matematisk Modell

Parametere

- P : Antall terminaler.
- V : Antall vogn typer.
- T : Antall tidsperioder.
- M_i : Maksimal lagringskapasitet, gitt i lengde, ved terminal i .
- L_{ij}^{max} : Maksimal lengde på sendinger mellom terminal i og terminal j .
- S_v : Lengden på en vogn av type v .
- $D_{ij}^{(t)}$: Etterspørsel av containere (TEU) på ruten fra terminal i til terminal j ved tid t .
- C_v : Kapasitet av containere (TEU) per vogn av type v .
- R_{ij} : Reisetid mellom terminal i og terminal j .
- $O_{ij}^{(t)}$: Omstillingstid for vognsett mellom terminal i og terminal j gitt tid t .

Mengder

- $\mathcal{P} = \{1, \dots, P\}$
- $\mathcal{V} = \{1, \dots, V\}$
- $\mathcal{T} = \{1, \dots, T\}$

Beslutningsvariabler

- $x_{ijv}^{(t)}$: Antall vogner av type v sendt fra terminal i til terminal j ved tid t .
- $y_{iv}^{(t)}$: Lagerbeholdning av vogner av type v ved terminal i ved tid t .

Målfunksjon

$$\min \sum_{i \in \mathcal{P}} \sum_{v \in \mathcal{V}} y_{iv}^{(0)} \quad (5.1)$$

Begrensninger

Oppdatering av Lagerbeholdning ved Terminal i :

$$y_{iv}^{(t+1)} = y_{iv}^{(t)} + \sum_{j \in \mathcal{P}} x_{jiv}^{(t - (R_{ji} + O_{ji}^{(t)}))} - \sum_{i \in \mathcal{P}} x_{ijv}^{(t)}, \quad i, j \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T}, v \in \mathcal{V} \quad (5.2)$$

Finner lagerbeholdning av type v ved terminal i gitt tid $t + 1$. Tar inn forrige lagerbeholdning, legger til innkommende vogner, og fjerner utgående vogner. Innkommende vogner er regnet tid t , minus tid mellom terminalene og omstillingstid. Omstillingstid er avhengig av tid, da noen ruter fortsetter videre, og omstillingstiden er da mindre enn ellers.

Maksimum lagringskapasitet ved Terminal i :

$$\sum_{v \in \mathcal{V}} S_v \cdot y_{iv}^{(t)} \leq M_i, \quad i \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T}, v \in \mathcal{V} \quad (5.3)$$

Passer på at summen av lengdene på vognene på terminalen ikke overstiger maksimum lagringskapasitet. Summerer sammen alle produktene av lengden til vogntypen og antall vogner av den gitte vogntypen, på terminalen Totalen skal da være mindre eller lik maksimal lagringskapasitet, gitt i lengde.

Maksimal Lengde på Sendinger mellom Terminal i og j :

$$\sum_{v \in \mathcal{V}} S_v \cdot x_{ijv}^{(t)} \leq L_{ij}^{(t)}, \quad i, j \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T}, v \in \mathcal{V} \quad (5.4)$$

Forsikrer seg om at lengden på togsettet holder seg innafor lengdebegrensningen på ruten. Summerer sammen alle produktene av lengden til vogntypen og antall vogner av den gitte vogntypen, på strekningen.

Etterspørsel på Ruter mellom Terminal i og Terminal j :

$$\sum_{v \in \mathcal{V}} C_v \cdot x_{ijv}^{(t)} \geq D_{ij}^{(t)}, \quad i, j \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T}, v \in \mathcal{V} \quad (5.5)$$

Forsikrer seg at togsettet på ruten dekker etterspørselen. Summerer sammen alle produktene av kapasiteten til vogntypen og antall vogner av den gitte vogntypen, på strekningen.

Positiv Heltallsbegrensning:

$$x_{ijv}^{(t)}, y_{iv}^{(t)} \geq 0, \quad x_{ijv}^{(t)}, y_{iv}^{(t)} \in \mathbb{Z} \quad (5.6)$$

Alle variabler er positive heltall.

5.2 Implementasjon i Excel

For å kunne implementere den matematiske modellen inn i Excel må man først sette opp parameterene. Man må avgjøre hvor mange terminaler, vogntyper og tidsperioder modellen skal dekke. Videre må man sette opp fullstendig rutetabell for den gitte perioden. Rutetabellen vil da inkludere informasjon om hvilke terminaler ruten går mellom, tidsrom ruten går og omstilling, lengdebegrensning på ruten og etterspørsel av containere. Så må man sette opp en tabell med informasjon om terminalene og vognene. Denne informasjonen inkluderer makskapasitet på terminalene, og antall TEU og lengde på hver vogntype. Videre må det settes opp en tabell med tidsperioder den ene veien, og vogntyper ved terminalene den andre veien. Dette gjøres for å ha en oversikt over hvor mange vogner av hver type som er på terminalene ved et gitt tidspunkt. Til slutt må man sette opp en tabell som viser hvor mange vogner, av hver type, som hver terminal begynner med, og en tabell som viser hvor mange vogner, av hver type, som blir sendt med hver rute. Tabellen med tidsperiodene og vognene ved hver terminal, henter da inn denne informasjonen, for å oppdatere vognbeholdingen ved hver terminal til en hver tid.

5.2.1 Forklaring av optimeringsmodell

Optimeringsmodellen er satt opp som en rutetabell for alle rutene CargoNet opererer med på fast basis, over en to ukers periode. Modellen henter inn etterspørsel på TEU fra historiske data. Videre benytter modellen seg av tognummer, avgangsdag og uke for å innhente riktig etterspørsel. Deretter benytter den seg av vogngruppe, for å filtrere etterspørsel mellom terminaler, da de historiske dataene ikke deler opp rutene. Hvis et tog skal fra Trondheim til Bodø, blir alt sendt fra Alnabru på samme tid og ikke delt opp som i produksjonsplanen. Hvordan vår modell ser ut er vist i Delkapittel 5.1. Sammenlinket med CargoNet sin produksjonsplan viser vår modell også når togsettet vil være klart til bruk. Dette er da inkludert omstillingstid der det forekommer. Faktisk etterspørsel er den etterspørselen som er hentet ut fra historiske data.

Strekning	Tognr	Fra terminal	Avgangstid	Til terminal	Ankomsttid	Klar til bruk	Avgangsdag	Uke	Faktisk etterspørsel
Nordland Nord	5781	Trondheim	16:21:00	Mosjøen	22:27:00	22:27:00	Mandag	51	56
Nordland Nord	5781	Mosjøen	23:00:00	Mo i Rana	00:19:00	00:19:00	Mandag	51	40
Nordland Nord	5781	Mo i Rana	00:49:00	Fauske	03:34:00	03:34:00	Tirsdag	51	32
Nordland Nord	5781	Fauske	03:47:00	Bodø	04:30:00	08:00:00	Tirsdag	51	32

Tabell 5.1: Vår modell - Rute 5781

Videre er det laget en variabel som bestemmer hvor mange av hver vogntype som sendes for å etterkomme etterspørselen. Dette bestemmer lengden på togsettet, som sjekkes opp mot lengdekravet til den spesifikke ruten. Til slutt sjekkes det om antall TEU er likt som etterspørselen. Tabell 5.2 er et eksempel på at den returnerende ruten har høyere etterspørsel enn den gitte ruten, derfor er etterspørsel høyere enn faktisk etterspørsel. Dette er da et eksempel på CargoNet sin løsning, til forskjell fra vår. Endringer som må gjøres for å tilpasse seg til vår løsning er å ta utgangspunkt i faktisk etterspørsel, og gjøre det mulig å sende flere vogner enn etterspørselen.

Vogntype 4955	Vogntype 4432	Lengde togsett		Max Lengde	Antall TEU	=	Etterspørsel	Faktisk etterspørsel
0	0	0	≤	640	0	=	44	32

Tabell 5.2: Sendte vogner

Deretter hentes vognene, som er brukt til å etterkomme etterspørselen, inn i Tabell 5.3 for den gitte dagen. Tabellen blir da en oversikt over hvor mange vogner av hver type den enkelte terminal har til disposisjon.

1 (Mandag)	Alnabru		Bergen		...
	4955	4432	4955	4432	
Antall vogner start	0	0	0	0	...
00:00	0	0	0	0	...
01:00	0	0	0	0	...
02:00	0	0	0	0	...
03:00	0	0	0	0	...
04:00	0	0	0	0	...
05:00	0	0	0	0	...
06:00	0	0	0	0	...
07:00	0	0	0	0	...
...

Tabell 5.3: Antall vogner hvor, til hvilken tid

Til slutt i modellen er det en oppsummerende tabell som inneholder startantallene av vogner som hver terminal skal ha. Disse verdiene blir da summert og det er denne summerte verdien som skal minimeres. Man får da en oversikt over antall vogn hver terminal har ved tidspunkt 0, avhenging av optimeringsgrunnlaget. Jo lavere denne summen er, jo mer lovende er løsningen.

Kapittel 6

Casestudie

Til nå har vi sett på ett eksempelscenario, samt fått en oversikt over hvordan den matematiske modellformulasjonen for oppgaven er. I dette kapitlet vil vi gå dypere inn i den konkrete problemstillingen CargoNet står ovenfor, nemlig utfordring med et overskudd på total antall vogn i vognparken.

Dette overskuddet fungerer som en sikkerhetsmargin, slik at det ikke skal oppstå situasjoner der de ikke kan møte etterspørsel på containere på grunn av mangel på vogn. CargoNet har et ønske om å redusere total antall vogn, uten at det skal kompromittere servicegraden. Overskuddet på vogn binder kapital som CargoNet ønsker å frigjøre. Det er flere faktorer som spiller inn på hva som er årsaken til at CargoNet opererer med et overskudd. Vi vil også i denne delen av oppgaven presentere de dataene vi har fått utlevert fra CargoNet og hvordan vi har bearbeidet disse. Disse dataene er grunnlaget for optimeringsmodellen vi benytter oss av. Videre skal vi gi en bredere forståelse på hvordan CargoNet løser det i dag. Til slutt skal vi gå gjennom hvilke perioder og scenarier modellen vår skal ta for seg.

6.1 Data og metode

Fra det innledende sonderingsstadiet til avsluttende datainnhenting, har vi brukt ulike fremgangsmåter for å innhente data. I starten var det for det meste rettede Google-søk, før vi etterhvert fikk tilsendt produksjonsplan og historiske data fra CargoNet. Kontaktpersonen vår i CargoNet har alltid vært behjelpelig med svar på de spørsmålene vi har stilt, og mye av kommunikasjonen har blitt gjort via epost. I februar hadde vi også et terminalbesøk på Trondheim godsterminal hvor vi fikk se allokering av vogner i praksis, samt generelt terminalarbeid. Terminalbesøket var viktig for å gi oss en bredere forståelse av arbeidet som utføres og verdikjeden til CargoNet. Dette delkapitlet vil gå dypere inn i data vi har hentet ut, og vil bli nærmere forklart, samt satt i sammenheng med den overordnede problemstillingen.

6.1.1 Produksjonsplan og historiske data

Noe av det første vi fikk tilsendt var CargoNets produksjonsplan og historiske data. CargoNet bruker produksjonsplanen som utgangspunkt for sin transportvirksomhet. En nærmere beskrivelse av utarbeidelsen av produksjonsplanen ble gitt i Underkapittel 2.4. Tabell 6.1 viser et utdrag fra Bergensruta i produksjonsplanen fra 2024. Her ser man strekning, tognummer, samt startsted og stoppested. Produksjonsplanen viser også hvilket tog som skal gå, til hvilken tid og på hvilke dager. Lengde på tog og trekkraften som trengs er også vist, ved siden av en antatt forespørsel på TEU, og hvor mange av hvilken vogntype som er planlagt på togsettet.

Strekning	Tognr	Fra	Avg tid	Til	Ank tid	Kjøredager	Lengde	Trekkraft	Man	Tir	Ons	Tor	Fre	Lør	Søn	Vogntype 4955	Vogntype 4432	Antall TEU
Bergen	5506	Bergen	08:48	Alnabru	17:18	man-fre	640	1400	X	X	X	X	X			8	8	48
Bergen	5507	Alnabru	12:23	Bergen	20:25	man-fre	640	1400	X	X	X	X	X			8	8	48
Bergen	5508	Bergen	15:46	Alnabru	00:43	man-fre	430	790	X	X	X	X	X			8	8	48
Bergen	5509	Alnabru	17:58	Bergen	01:39	man-fre	430	850	X	X	X	X	X			8	8	48
Bergen	5510	Bergen	19:37	Alnabru	03:30	man-fre	430	850	X	X	X	X	X			8	8	48
Bergen	5511	Alnabru	19:55	Bergen	03:21	man-tor	430	1000	X	X	X	X				8	8	48
Bergen	5512	Bergen	22:22	Alnabru	05:56	man-tor	640	1400	X	X	X	X				8	8	48
Bergen	5515	Alnabru	21:58	Bergen	05:32	man-fre	640	1400	X	X	X	X	X			8	8	48
Bergen	5520	Bergen	08:48	Alnabru	16:33	lør	640	1400						X		8	8	48
Bergen	5522	Bergen	19:07	Alnabru	03:01	søn	640	1400							X	8	8	48
Bergen	5523	Alnabru	19:55	Bergen	03:21	søn	640	1400							X	8	8	48
Bergen	5527	Alnabru	14:02	Bergen	21:54	søn	430	790							X	8	8	48

Tabell 6.1: Produksjonsplan eksempel

Videre blir all data fra foregående år lagret i en database som CargoNet benytter seg av til planlegging av kommende år. De historiske dataene er utgangspunktet for den nåværende, og fremtidige produksjonsplaner. Der produksjonsplanen viser planlagte ruter med avgangstid og ankomsttid, kjøredager og en antatt etterspørsel på TEU, viser historiske data faktiske ruter kjørt og faktisk antall TEU sendt. I Tabell 6.2 kan man se et utdrag fra historiske data fra 2020. Sammenliknet med Tabell 6.1 kan man se strekning og tognummer, men historiske data viser blant annet eksakt avgangstidspunkt, ledig TEU, salg TEU og den realiserte kapasiteten på togsettet. Utnyttelsesgraden på togsettet er også vist. Dette er eksakte registrerte data på alt transportarbeidet CargoNet gjorde i 2020. For oppgaven skal vi bruke historiske data fra 2023, men grunnet konkurransehensyn for CargoNet blir tall fra 2020 vist som eksempel.

Bane	Vogngruppe	Avgangstognummer (vgr)	Uke	Avgangstidspunkt	Ukedag	Ledig TEU	Realisert salg TEU	Realisert kapasitet TEU	Realisert utnyttelsesgrad TEU
Bergensbanen	BRG - ALN	5520	52	29.12.2020 8:48:00	Lørdag	14	34	48	71%
Bergensbanen	ALN - BRG	5515	52	29.12.2020 21:58:00	Fredag	34	14	48	29%
Bergensbanen	BRG - ALN	5510	52	29.12.2020 19:37:00	Fredag	7	37	44	84%
Bergensbanen	ALN - BRG	5509	52	29.12.2020 17:58:00	Fredag	19	29	48	60%
Bergensbanen	BRG - ALN	5508	52	29.12.2020 15:46:00	Fredag	3	45	48	94%
Bergensbanen	ALN - BRG	5507	52	29.12.2020 12:23:00	Fredag	8	40	48	83%
Bergensbanen	DRM - ALN	5302	52	29.12.2020 12:05:00	Fredag	8	4	12	33%
Bergensbanen	ALN - DRM	5301	52	29.12.2020 8:51:00	Fredag	1	15	16	94%

Tabell 6.2: Historiske data eksempel

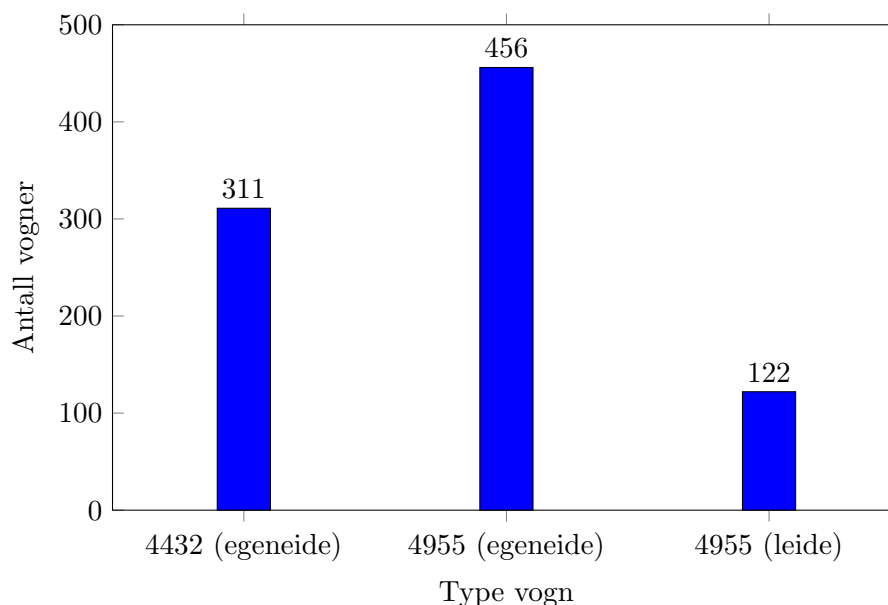
Selv om dataene vi mottok fra CargoNet var tilstrekkelig for oppgaven, er det likevel noen utfordringer vi har møtt på, som er verdt å belyse. Produksjonsplanen operer med en antatt etterspørsel på TEU, noe vi har valgt å se bort ifra da vi baserer etterspørselen på historiske data fra 2023. Vi mener at dette vil gjøre modellen mer presis, da produksjonsplan med antatt etterspørsel trer i kraft før de historiske dataene fra samme år er klare. Denne prosessen er nærmere beskrevet i Underkapittel 2.4. Videre var deler av de historiske dataene uoversiktlige og inkluderte ruter som lå utenfor oppgavens omfang. En årsak til de uoversiktlige dataene er

at CargoNet oppretter en ny rute-ID for alle enkeltruter, forsinkelser og bestillingsruter. Derfor har vi valgt å se bort fra enkeltruter og bestillingsruter. Sett i et større perspektiv utgjorde disse rutene uansett en minimal andel av total TEU. Ruter som var forsinket eller flyttet ble justert til originaltidspunktet. Til slutt manglet det historiske data på antall og type vogn som hadde blitt brukt på rutene, da CargoNet ikke inkluderer det i sine historiske data. Derfor har vi sett oss nødt til å modellere CargoNet sin løsning, for å ha resultater å sammenligne vår løsning med. Optimeringsmodellen har da stått fritt til å velge hvilke type og hvor mange vogner den setter opp på rutene, for å etterkomme etterspørselen.

Gitt utfordringene, er produksjonsplanen og historiske data, grunnlaget for caset vi har jobbet med. Uten disse ville vi ikke hatt tilstrekkelig informasjon til å utvikle modellen vi har laget i Excel.

6.1.2 Informasjon om vognpark

Vognparken til CargoNet er estimert til rundt 311 egneide av vogntype 4432, 456 egneide av vogntype 4955 og 122 innleide av vogntype 4955. Dette tilsvarer en vognpark på 889 vogner. I daglig drift anslår CargoNet at de opererer med ca. 500 vogner, fordelt på antall tilgjengelige 4432 og 4955. Figur 6.1 viser fordelingen av de ulike vognene. CargoNet disponerer også andre industrivogner, men som nevnt i Underkapittel 2.4 inngår ikke disse i oppgavens omfang.



Figur 6.1: Stolpediagram vognpark, før optimering

CargoNet anslår altså at de opererer med et vognoverskudd på nærmere 30 prosent. Spesielt interessant for CargoNet er om de kan minimere bruken på innleide vogner, da disse har høyest årlig kostnad. Vist i Tabell 6.3 ser man en oversikt over årlig kostnad på de to ulike vognene. Her ser man at 4432 er absolutt billigst i drift, mens egneide 4955 ligger 150 000 NOK lavere enn innleide 4955. Ved å minimere antall leasede vogner vil CargoNet kunne oppnå store årlige

besparelser. Dette er virkelighetsnære men fiktive tall, grunnet konkurransehensynet vi må ha ovenfor CargoNet.

Vogntype	Kostnad (NOK)
Lgns 4432	120 000 per vogn
Sdggmrs 4955	300 000 per vogn
Sdggmrs 4955 (leaset)	450 000 per vogn

Tabell 6.3: Årlig kostnad vogn inkludert vedlikehold, fiktive tall

6.1.3 Dataanalyse

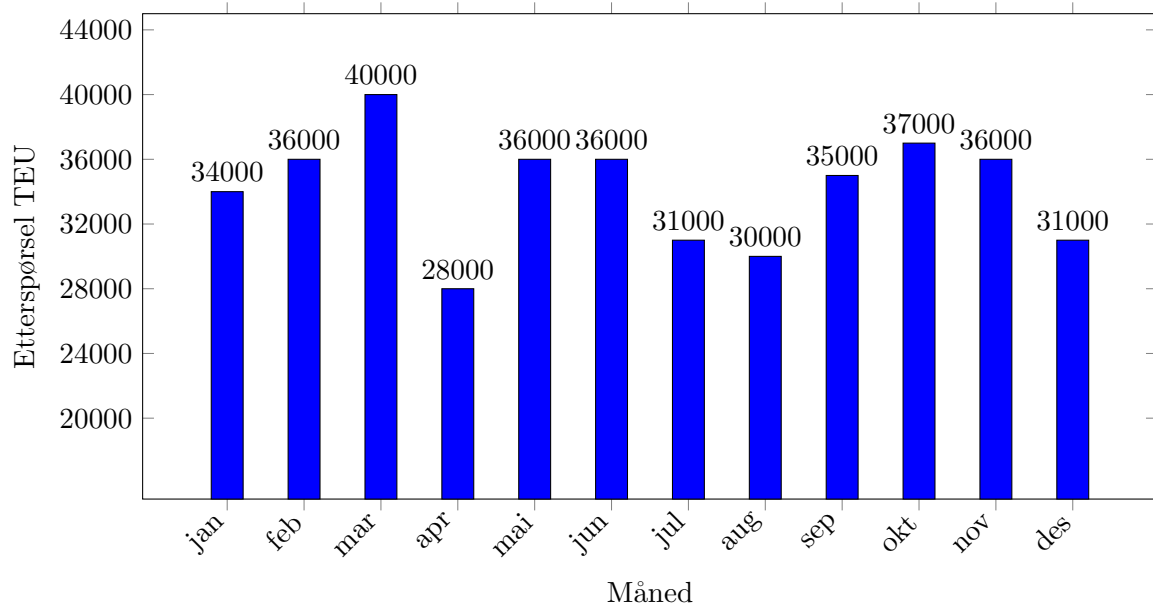
For å analysere og sortere de dataene vi har motatt, har Excel vært et nyttig verktøy. Data-materialet har blitt lagret i respektive filer, hvor sammenhengende data har blitt analysert opp mot hverandre og forsøkt sett i sammenheng. Et eksempel kan være historiske data. Da vi mottok disse dataene var det mange ruter som ikke var akutte for oppgaven. Dette krevde at vi sorterte og fjernet deller av dataene. Dette har også blitt gjort for produksjonsplanen, da noen ruter er nye for i år. Først når data var sortert kunne vi analysere den. Dataene som blir presentert i Delkapittel 6.2 er data hentet ut fra produksjonsplan og historiske data.

6.2 Problembeskrivelse og dagens løsning

På bakgrunn av informasjonen som er presentert i Delkapittel 6.1 vil dette delkapitlet gå nærmere inn på hva som ligger til grunn for at de opererer med et vognoverskudd. Det vil også bli forklart hvordan CargoNet løser dagens utfordringer utover det høye vognoverskuddet.

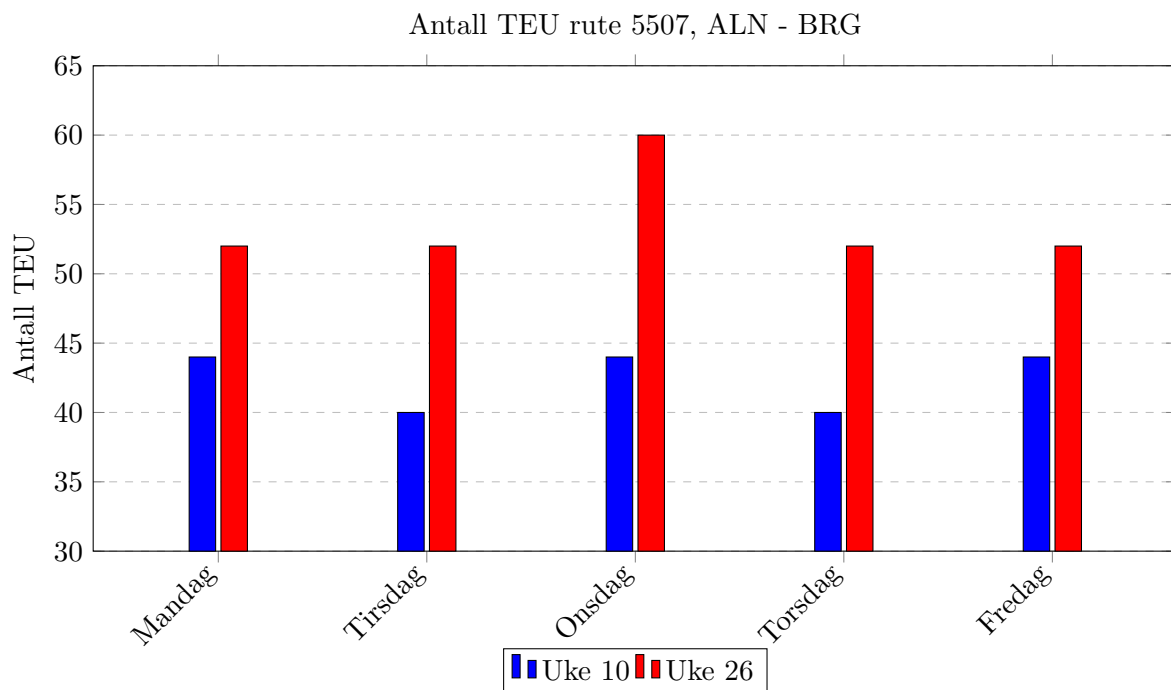
6.2.1 Varierende etterspørsel på containere

Grunnen til at CargoNet operer med et vognoverskudd mener vi er sammensatt. Varierende etterspørsel på TEU er en av faktorene. Figur 6.2 viser hvordan etterspørselen på TEU fordeler seg utover året. Denne etterspørselen danner grunnlaget for antall vogn bedriften må ha i sin vognpark. Som stolpediagrammet viser ser man at det er store variasjoner i de forskjellige månedene, som indikerer at CargoNet må ha tilstrekkelig vogn for å ha god dekning gjennom hele året. Her er tallene justert grunnet konkurransehensyn, men de gir likvel en god oversikt på hvordan etterspørselen utvikler seg gjennom året.



Figur 6.2: Månedlig etterspørsel TEU 2023

Det er også forskjellig etterspørsel på de enkelte rutene, basert på hvilken dag i uken de blir kjørt og hvilken uke i året det er. Figur 6.3 sammenligner etterspørselen på TEU for rute 5507 mellom Alnabru og Bergen i Uke 10 og Uke 26. Her kan vi se at det er betydelige forskjell i etterspørsel.

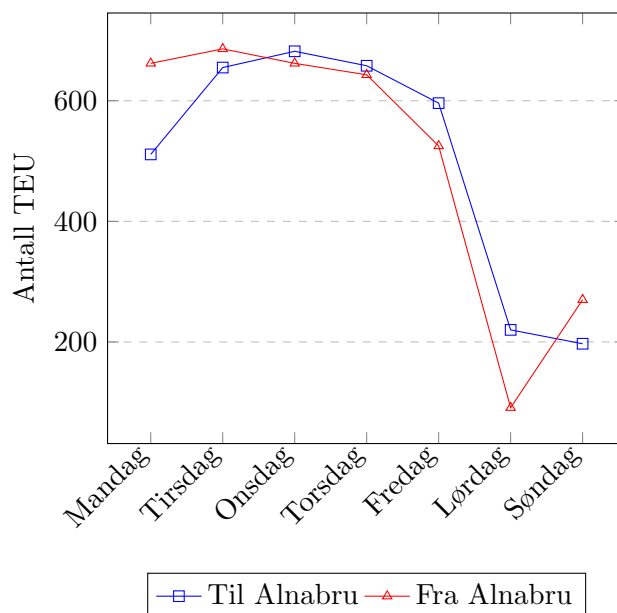


Figur 6.3: Antall TEU sendt med rute 5507, ALN - BRG, i uke 10 og 26

Det vi antar har mest innvirkning på fordelingen av vogner, er den ujevne etterspørselen mellom terminalene. Som Figur 6.4 viser, ser vi at det sendes flere TEU fra Alnabru i starten av uka,

enn det som mottas. Utover uka utjevnes dette, ved at det mottas tilnærmet like mye som det blir sendt, før det i slutten av uka snur igjen og det blir sendt mer enn det som mottas. Denne ujevne strømmen av mottak og sending av TEU, gjør det mulig å ikke sende de samme vognstammene tur-retur, men sette igjen vogner i starten av uken som senere blir benyttet i slutten av uken.

Gjennomsnittlig TEU over en uke basert på 2023



Figur 6.4: Gjennomsnittlig antall TEU til og fra Alnabru, 2023

6.2.2 Reaktivt og planlagt vedlikehold

Vedlikehold av utstyr bidrar betydelig til overskuddet av vogner, ettersom en del av vognparken stadig er ute av drift for vedlikeholdsarbeid. Vognene som frakter containerene er utsatt for mye slitasje og hard bruk. Spesielt på vinterstid opplever CargoNet at tilgjengeligheten på vogn minker, ettersom forholdene under vinterhalvåret sliter mer på utstyret enn forholdene under sommerhalvåret. Resultatet er at CargoNet må ha tilstrekkelig vogn for å dekke opp for reaktivt vedlikehold, og samtidig ha muligheten for planlagt vedlikehold. Vi går som nevnt i Underkapittel 4.1.2 ikke inn på selve vedlikeholdsdelen i denne oppgaven, men det er likevel viktig for forståelsen. Vedlikehold er en viktig faktor og er med på å forklare hvorfor CargoNet velger å ha et overskudd på vogn.

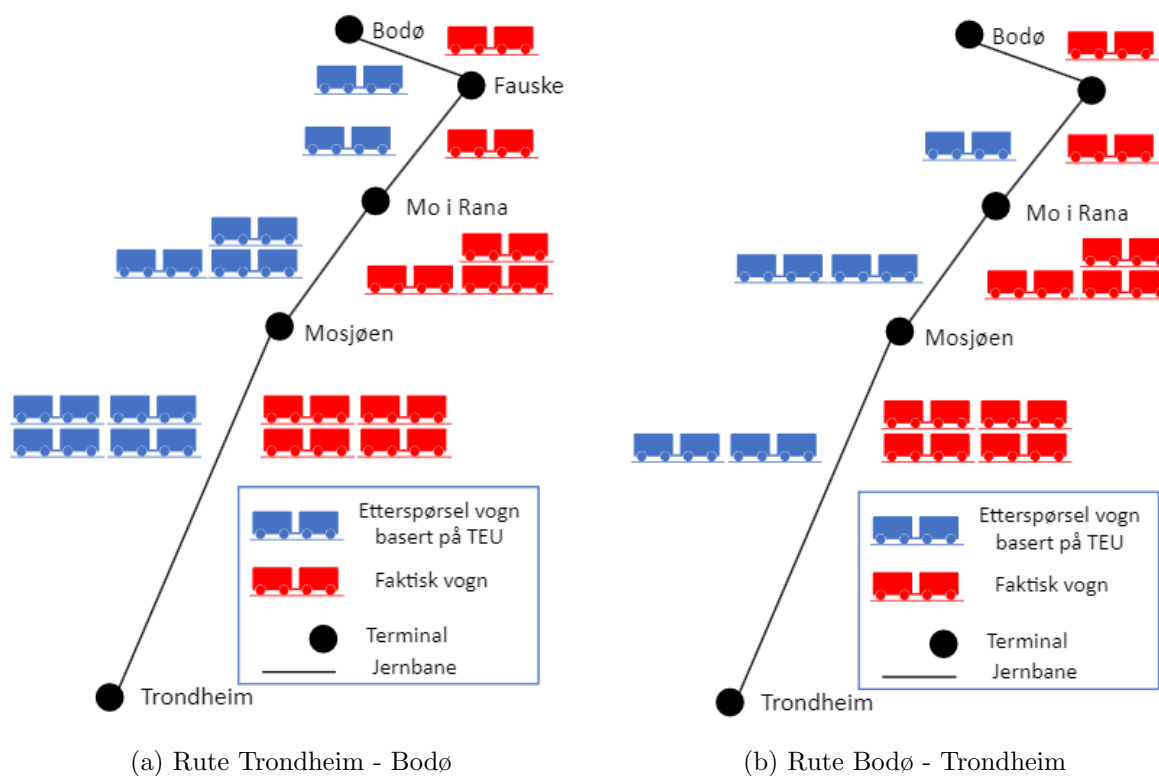
6.2.3 Infrastruktur

Avslutningsvis spiller infrastrukturen på det norske jernbanenettet en viktig rolle. Som tidligere nevnt i Underkapittel 2.2.1 er det lange strekninger med enkeltspor, som påvirker kapasiteten på jernbanen. Kryssplassene hvor togsettene kan møtes, har ofte korte avstander, noe som tvinger CargoNet til å kjøre med kortere togsett enn ønsket. Dette gjør det utfordrende å transportere

tomme vogner uten nøye planlegging. Løsningen til CargoNet er da å heller operere med et overskudd for å ikke gå tom for vogn. Avgjørelser på infrastruktur er på strategisk nivå, noe som også er utenfor omfanget til denne oppgaven. Men det er likevell viktig å belyse problemene CargoNet står ovenfor, og hva som gjør at de opererer med et overskudd.

6.2.4 Dagens løsning

For å møte dagens utfordringer, og samtidig ha nok vogn til å dekke etterspørsel løser CargoNet problemene hovedsakelig på to måter. Den første løsningen er å ha et klart overskudd av vogn på generell basis. Overskuddet skal virke som en buffer som forhindrer manko ved uforutsette og forutsette hendelser, samt balansere ujevnheten på antall vogn fra terminal til terminal. Den andre løsningen er at CargoNet slår sammen to ruter, tilsvarende tur-retur mellom to terminaler, og kjører med et faste togsett tilsvarende den høyeste etterspørselen mellom terminalene. I Figur 6.5 vises en oversikt på en strekning CargoNet opererer i. En rute som går Trondheim-Mosjøen-Mo i Rana-Fauske-Bodø vil kunne ha ulik etterspørsel sammenlignet med den returnerende ruten som går Bodø-Fauske-Mo i Rana-Mosjøen-Trondheim.



Figur 6.5: Eksempelsituasjon av togsett opp og ned

Med dagens løsning kjører den samme vognstammen tur-retur alle rutene. Hvis en togsett parkerer 6 vogn med containere i Mosjøen, plukker den det opp igjen på vei til Trondheim, selv om det bare er containere på halvparten av vognene. Utgangspunktet for hvor mange vogn som blir sendt vil være etterspørselen på TEU, fordelt på antall tilgjengelige vogn av 4423 og

4955. Dette forminsker risikoen for at situasjoner hvor det er for lite vogner til å etterkomme etterspørselen oppstår, men på den andre siden fører dette til et overskudd av vogner.

Totalt sett fungerer CargoNets forretningsmodell, men ut ifra hva vi har belyst til nå, virker den ikke optimal. Gitt utfordringene som fremkommer i dette kapitlet tvinges CargoNet til å operere med et overskudd.

6.3 Valg av optimeringsintervall og -scenario

Som beskrevet i Delkapittel 6.2 møter CargoNet på utfordringer i deres drift. Ved å gå nøyere inn på disse, har vi valgt oss ut ulike optimeringsintervaller vi skal benytte oss av. Disse, samt begrunnelsen på hvorfor de er valgt vil bli presentert i dette underkapitlet. Det vil også bli forklart hvilke scenarioer vi skal optimere.

6.3.1 Valg av uker og scenario

Vi har valgt oss ulike uker, som oppgaven skal se nøyere på. Basert på dialogen med CargoNet og for å sikre en tilstrekkelig lang tidsperiode til å vise variasjoner, har vi bestemt at optimaliseringen skal utføres over en periode på to uker. Vi har valgt ut to og to uker over seks forskjellige tidsperioder, som representerer ulike variasjoner og endringer i etterspørselen på TEU gjennom året. Dette er for å se i hvilke situasjoner vår løsning presterer bedre enn CargoNet sin løsning. Vi mener at dette er representativt for å kunne komme med en konklusjon om vognbruken, senere i oppgaven. Tabell 6.4 gir en oversikt over dette.

Kategori	Uker	Variasjonstype	Beskrivelse
Basert på etterspørsel av TEU på rutene	Uke 5 og 6	Liten variasjon (LV)	LV i etterspørsel mellom rutene
	Uke 37 og 38	Stor variasjon (SV)	SV i etterspørsel mellom rutene
Basert på total etterspørsel av TEU mellom uker	Uke 12 og 13	Høyest etterspørsel (HE)	Høyest total etterspørsel
	Uke 14 og 15	Lavest etterspørsel (LE)	Lavest total etterspørsel
	Uke 30 og 31	Identisk etterspørsel (IM)	Identisk total etterspørsel
	Uke 13 og 14	Størst variasjon (VM)	Størst variasjon i total etterspørsel

Tabell 6.4: Oversikt over etterspørselsmodeller og variasjonstyper

Ukene er valgt ut med hensyn på å se hvordan variasjon mellom etterspørselen på rutene og total etterspørsel påvirker modellene. Ved å se på etterspørsel på rutene, vil vi se om det er noen besparelser å sende tomme vogner, selv om rutene har tilnærmet lik etterspørsel. Vi vil også kunne se om det faktisk er noen besparelser å ta utgangspunkt i faktisk etterspørsel og eventuelt sende tomme vogner i tillegg, i motsetning til å slå sammen ruter. Å basere seg på total etterspørsel gjør det mulig for oss å se hvordan løsningene fungerer i generelle omstendigheter. Vil besparelsene vår modell oppnår, være prosentvis høyere ved høy etterspørsel kontra lav etterspørsel, eller vil det ikke ha noe å si. Vi ønsker også å se på om stabilitet i total etterspørsel, vil ha noe å si for prosentvis besparelse.

For å videre avgrense og definere optimeringen har vi valgt oss ut ulike optimeringsscenarioer. Først og fremst skiller vi mellom to ulike modeller. Den ene optimerer slik CargoNet løser

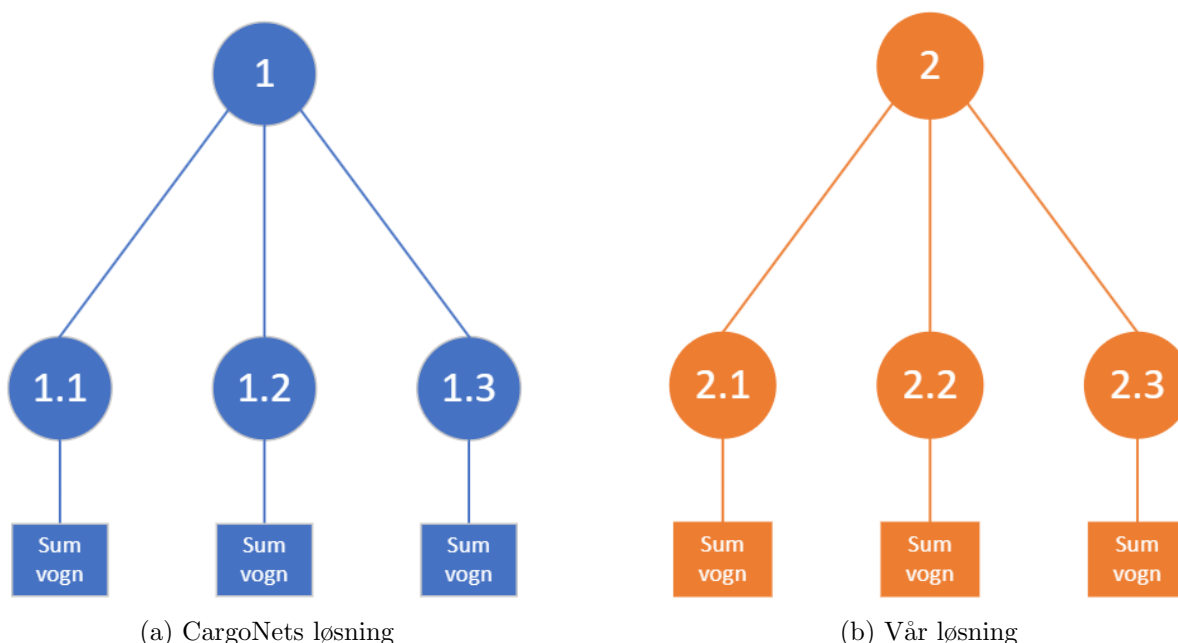
transporten i dag, altså ved å kjøre samme vognstamme tur/retur uavhengig etterspørsel. Den andre løser det på vår måte, hvor modellen tar utgangspunkt i faktisk etterspørsel, og med den ledige kapasiteten er det mulig å sende tomme vogner. Deretter har vi tre ulike scenarier vi skal teste med de to modellene. Den første er en 70/30 prosentfordeling på vogn, hvor den optimeres med overvekt på 70 prosent av 4955-vogna og 30 prosent av 4432-vogna. Dette er for å holde lik prosentfordeling av vognene som de har i dag. Den andre optimerer med en målfunksjon for å redusere total kostnaden på vognparken. Det tredje scenariet minimerer total antall vogn, slik at modellen finner optimal løsning uavhengig av fordelingen mellom vognene og kostnader. Dette er også forklart i Tabell 6.5.

Modell	Scenario	Sum vogner
CargoNets løsning optimert	Optimalisert med 70% 4955 og 30% 4432	x
	Optimalisert for lavest mulig kostnader	x
	Optimalisert uten begrensninger	x
Vår løsning optimert	Optimalisert med 70% 4955 og 30% 4432	x
	Optimalisert for lavest mulig kostnader	x
	Optimalisert uten begrensninger	x

Tabell 6.5: Modell og optimeringsscenarier

Figur 6.6 er et flytskjema som viser de to ulike optimeringsmodellene, med de ulike scenarioene og målfunksjonen til slutt. Denne visualiseringen kan gi en enklere forståelse av hvordan optimeringsprosessen fungerer, gitt de to ulike modellene med hver av scenarioene og til slutt målfunksjonen som skal minimeres.

Figur 6.6: Flytskjema modell



Våre antagelser er at måten CargoNet løser det på i dag ikke er optimal. Dette vil gjenspeiles i

utfallet på optimeringene. Av de tre scenarioene ser vi for oss at scenarioet uten begrensninger vil komme best ut, både for CargoNet-modellen og vår modell. Vi tror deretter scenarioet med tanke på lavest mulig kostnader vil prioritere 4432-vogna over 4955-vogna, ettersom førstnevnte er billigere enn sistnevnte. 70/30-scenarioet ser vi for oss ligge på ca. samme nivå av vogner som CargoNet anslår de bruker daglig, men at vår modell vil ha et lavere antall vogn ettersom den modellen gjør det mulig å sende tomme vogner fra terminal til terminal.

Kapittel 7

Resultater

I dette kapitlet vil vi innledningsvis gi en kort introduksjon til Simplex, som er algoritmen vi bruker for å optimere, og OpenSolver, som er optimeringsverktøyet vi benytter oss av i Excel. Deretter vil dataen vi har optimert legges fram og bli analysert.

7.1 Simplex og OpenSolver

Simplex og OpenSolver er grunnlaget for optimeringsmodellen i Excel. Simplex er en algoritme for å løse lineære programmeringsproblemer. Dette er matematiske problemer som søker å maksimere eller minimere en lineær funksjon under gitte lineære begrensninger. Lineær programmering er mye brukt i logistikkfeltet, og ellers generelt andre fagområder hvor ressursallokering er viktig.

OpenSolver derimot er et kraftig og gratis optimeringsverktøy for Excel. Verktøyet benytter seg av open-source lineære og ikke-lineære løsningsalgoritmer for å løse optimeringsproblemer. OpenSolver er et alternativ til Excels innebygde Solver, men med flere muligheter og uten begrensningene som den innebygde Solver i Excel har. Vi opplevde utfordringer med at Excels innebygde Solver bare kan håndtere 200 variabler og 100 begrensninger, mens vår modell inneholder 1574 variabler og rundt 17000 begrensninger. OpenSolver bruker rundt 2 minutter og 30 sekunder på å sette opp problemet, og bruker skjeldent mer enn 5 sekunder for å løse det. Dette har ført til at det var lett å teste modellen, og kjøre mange analyser.

7.2 Analyse

Vår analyse er bygd opp slik at i Delkapittel 7.2.1 legger vi frem CargoNets modell optimert, hvor vi visualiserer og kommenterer resultatene for de tre ulike scenarioene. I Underkapittel 7.2.2 vil vi gjøre det på samme måte, bare for vår modell. Fra nå vil CargoNet sin løsning/modell bli kalt SymmetriskPolicy, og vår løsning/modell kalt AsymmetriskPolicy. Videre vil vi sammenligne

resultatene, og se på hvilke scenarier vår løsning fungerer bedre enn CargoNet sin.

7.2.1 SymmetriskPolicy optimert

Tabell 7.1 viser antall vogn CargoNet trenger for de ulike ukene, optimert på bakgrunn av de forskjellige scenariene. Når det gjelder 70/30 fordelingen ser vi at det totale antall vogn holder seg nogen lunde jevnt rundt 550 vogner, hvor majoriteten er av vogn 4955. For scenariet hvor den totale kostnaden av parken skal være så lav som mulig ser vi derimot et høyere total antall vogn, noe som gir mening ettersom det krever flere 4432 vogner for å dekke opp etterspørselen. For scenariet uten begrensninger ser vi at den optimale løsningen hovedsakelig velger vogn 4955. Dette scenariet er klart også det scenariet som kommer best ut med tanke på total antall vogn. Her har vi klart det laveste antallet på 405 vogner, sammenliknet med kostnadsscenarioet på 550 vogner og 70/30 fordelingen på 465 vogner. Vi ser også at uke 30-31 er den uken hvor behovet for vogner er minst.

		Uke 5-6	Uke 37-38	Uke 12-13	Uke 14-15	Uke 30-31	Uke 13-14
SymmetriskPolicy - 70/30 fordeling	4955	377	394	382	366	325	383
	4432	162	170	164	157	140	165
	Total	539	564	546	523	465	548
SymmetriskPolicy - m.t.p. kostnad	4955	302	324	311	289	239	311
	4432	311	311	307	311	311	311
	Total	613	635	618	600	550	622
SymmetriskPolicy - ingen begrensning	4955	449	470	456	437	386	455
	4432	17	15	21	16	19	18
	Total	466	485	477	453	405	473

Tabell 7.1: Vognpark optimert - SymmetriskPolicy

Tabell 7.2 gir oss en oversikt over kostnadsreduksjon for vognpark i prosent. Med utgangspunkt i kostnaden for vognene fra Tabell 6.3, sammenliknet med resultatene fra Tabell 7.2 ser vi at besparelser på ca. 50 prosent kan være reelt. Den største prisreduksjonen er på 59 prosent, og er et resultat av scenariet optimert med tanke på kostnad. Sammenlikner vi med Tabell 7.2.1 ser vi at dette også er i uke 30-31. Sammenliknet med de to andre scenarioene ser vi også at deres uke med høyest prosentvis kostnadsreduksjon er også i uke 30-31.

	Uke 5-6	Uke 37-38	Uke 12-13	Uke 14-15	Uke 30-31	Uke 13-14
SymmetriskPolicy - 70/30 fordeling	50%	48%	49%	52%	57%	49%
SymmetriskPolicy - optimalisert m.t.p. kostnad	52%	49%	51%	53%	59%	51%
SymmetriskPolicy - ingen begrensning	49%	46%	48%	50%	56%	48%

Tabell 7.2: SymmetriskPolicy optimert, kostnadsreduksjon på vognpark i prosent

7.2.2 AsymmetriskPolicy optimert

Tabell 7.3 viser det samme som forklart i Tabell 7.1, bare for AsymmetriskPolicy. Her ser vi først og fremst at 70/30 fordelingen ligger på et sted mellom 400 og 500 vogner totalt. Igjen er det uke 30-31 som har minst antall vogn, og fordelingen viser en klar prioritering av 4955 over 4432. Når det gjelder scenariet for kostnad nærmer det totale antallet vogn seg 600, og vogn

4432 er tydelig mest prioritert her og. For scenariet med ingen begrensninger går totalen så lavt som ned på 357 vogner totalt, med en klar overvekt på vogn 4955. Av de tre ulike scenariene er det høyeste antallet på vogn på 582, noe som er en god reduksjon av antall vogn sammenlinket med vognparken CargoNet har i dag.

		Uke 5-6	Uke 37-38	Uke 12-13	Uke 14-15	Uke 30-31	Uke 13-14
AsymmetriskPolicy - 70/30 fordeling	4955	333	342	352	300	289	352
	4432	145	147	152	129	124	151
	Total	478	489	504	429	413	503
AsymmetriskPolicy - m.t.p kostnad	4955	250	259	271	210	196	271
	4432	311	311	311	311	311	310
	Total	561	570	582	521	507	581
AsymmetriskPolicy - ingen begrensning	4955	409	418	428	367	353	429
	4432	2	1	4	2	4	3
	Total	411	419	432	369	357	432

Tabell 7.3: Vognpark optimert - AsymmetriskPolicy

Vi ser i Tabell 7.4 at prosenten for kostnadsreduksjon for AsymmetriskPolicy har økt. Spesielt interessant er at vi nå har kommet oss opp på over 60 prosent besparelse i visse tilfeller. I uke 30-31 er tallet oppe på hele 64 prosent, for scenariet som optimerer med tanke på kostnad. Den laveste prosenten er nede på 51 prosent, noe man kan være fornøyd med. Vi ser igjen at uke 30-31 kommer godt ut, som henger sammen med den lave etterspørselen på vogn.

	Uke 5-6	Uke 37-38	Uke 12-13	Uke 14-15	Uke 30-31	Uke 13-14
AsymmetriskPolicy - 70/30 fordeling	56%	55%	53%	60%	62%	53%
AsymmetriskPolicy - optimalisert m.t.p kostnad	58%	57%	55%	62%	64%	55%
AsymmetriskPolicy - ingen begrensning	54%	53%	51%	58%	60%	51%

Tabell 7.4: AsymmetriskPolicy optimert, kostnadsreduksjon på vognpark i prosent

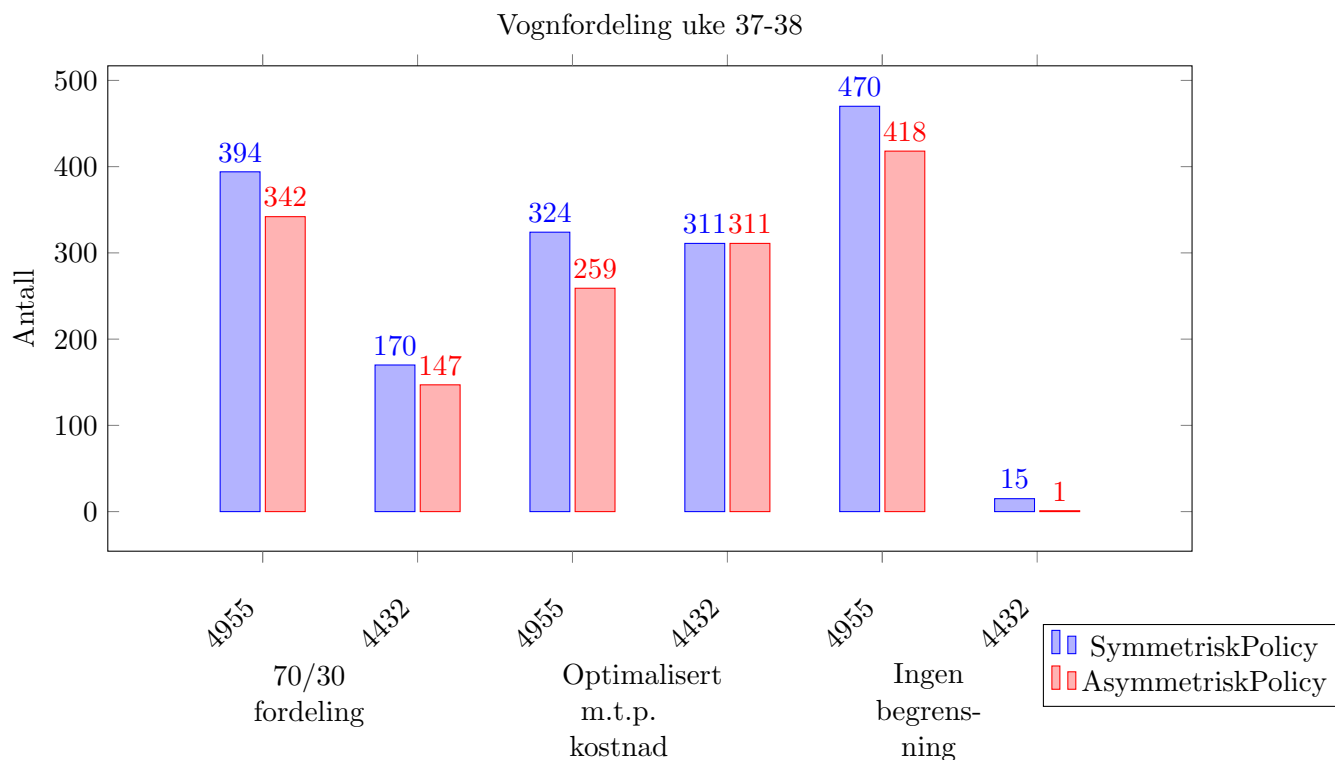
7.2.3 Sammenligning mellom løsningene

Tabell 7.5 viser en sammenlikning mellom resultatene fra SymmetriskPolicy og AsymmetriskPolicy. I uke 37-38 er det tilnærmet 7% ytterligere besparelse uansett scenario, mens i uke 14-15 er det tilnærmet 9% ytterligere besparelse. Dette er en periode med både stor variasjon i etterspørsel på rutene og en periode med lav total etterspørsel på TEU. Når vi snakker om bunnet kapital på dette nivået, kan disse prosentene bety flere millioner i frigjort kapital.

Ytterligere besparelser	Uke 5-6	Uke 37-38	Uke 12-13	Uke 14-15	Uke 30-31	Uke 13-14
70/30 fordeling	6%	7%	4%	9%	5%	4%
Optimalisert m.t.p kostnad	6%	7%	4%	9%	5%	5%
Ingen begrensning	5%	7%	4%	9%	4%	4%

Tabell 7.5: Ytterligere besparelser ved AsymmetriskPolicy i forhold til SymmetriskPolicy

Et annet relevant resultat er fordelingen av hvilken vogn som blir brukt. Figur 7.1 gir en samlet oversikt på fordelingen av 4432 og 4955 i uke 37-38. Man kan raskt legge merke til at, gitt de ulike scenarioene, er det 4955 som blir brukt mest.



Figur 7.1: Fordeling av vogner i uke 37-38 for forskjellige optimaliseringsscenarioer

Tabell 7.6 gir en oversikt over antall 4955 etter optimering, sammenliknet med den nåværende egeneide parken av 4955. Så lenge antall 4955 ikke overstiger 456 vil CargoNet teoretisk sett kunne stoppe å lease 4955-vogner, og ha betydelige besparelser på dette. Vi ser at i nesten samtlige scenarier, både for CargoNets modell og vår modell kan dette gjennomføres. Oftest med en meget god margin. I ett scenario, basert på CargoNets modell med ingen begrensninger-scenariet er det ikke mulig.

Vognfordeling uke 37-38

	Antall 4955	Nåværende egeneide 4955	Mulighet for å ikke lease vogner?
SymmetriskPolicy - 70/30 fordeling	394	456	Ja
SymmetriskPolicy - optimalisert m.t.p. kostnad	324	456	Ja
SymmetriskPolicy - ingen begrensninger	470	456	Nei
AsymmetriskPolicy - 70/30 fordeling	342	456	Ja
AsymmetriskPolicy - optimalisert m.t.p. Kostnad	259	456	Ja
AsymmetriskPolicy - ingen begrensninger	418	456	Ja

Tabell 7.6: Mulighet for å ikke lease vogner i uke 37-38.

7.2.4 I hvilke scenarier fungerer det best å sende tomme vogner?

Hvis vi sammenligner uke 12-13 og uke 14-15, henholdsvis de ukene med minst og mest ytterligere besparelser, og ser på hvilke strekninger som sender tomme vogner og hvor mange TEU over etterspørsel som sendes, kan vi få svar på hvilke forutsetninger som må være der for at AsymmetriskPolicy presterer bedre enn SymmetriskPolicy. Tabell 7.7 viser en oversikt med hvilke strekninger som sender tomme vogner. Vi ser at Nordland Nord har klart flest sendinger med tomme vogner. Dette kan forklares til dels at Nordland Nord er en lang strekning med totalt

fem terminal, men også at det er en strekning med mye variert etterspørsel. Etterspørselen på denne strekningen varierer fra terminal til terminal, tidspunkt på dagen og fra dag til dag. Denne varierte etterspørselen gjør slik at løsningen med å ta utgangspunkt i faktisk etterspørsel, og sende tomme vogner for å dekke den varierende etterspørselen, kan bli utnyttet til det fulleste.

Strekning	Uke 12-13			Uke 14-15		
	70/30	Kostnad	Ingen begrensning	70/30	Kostnad	Ingen begrensning
Bergen	17	20	20	5	8	8
Biltog Drammen	8	8	9	4	2	4
Biltog Bergen	2	1	2	1	1	1
Biltog Dovre	2	3	2	0	0	0
Dovre	14	20	18	9	15	12
Nordland Nord	140	150	150	74	73	85
Nordland Syd	29	25	32	14	15	15
Sørland	39	50	49	25	27	30
ARE I	16	17	21	7	7	14
ARE II	20	22	20	17	16	16
SRE I	10	12	12	7	7	9
SRE II	7	6	6	8	7	6
GORE	5	6	5	3	2	0
Total	309	340	346	174	180	200

Tabell 7.7: Antall sendinger med tomme vogner uke 12-13 og 14-15, AsymmetriskPolicy

Ser vi videre på Tabell 7.8, ser vi at differansen mellom total etterspørsel i uke 12-13 og uke 14-15 er på litt over 10 000 TEU. Selv om denne differansen er såpass høy, så er ikke differansen mellom TEU over etterspørsel i uke 12-13 og uke 13-14, på mer en 600-900. Videre kan vi gå inn og se på hvor tett opp til lengde begrensning disse strekningene er. I uke 12-13 ligger antallet ruter som kjører med togsett-lengde på mer enn 80% av maks lengde på rundt 370. I uke 14-15 ligger antallet ruter som kjører med togsett-lengde på mer enn 80% av maks lengde på rundt 190. Dette indikerer at vår løsning fungerer best når det er mye ledig kapasitet på rutene.

	Uke 12-13			Uke 14-15		
	70/30	Kostnad	Ingen begrensning	70/31	Kostnad	Ingen begrensning
Etterspørsel	28810	28810	28810	17414	17414	17414
Total sendt	31512	32002	31806	19580	19666	19728
TEU over etterspørsel	2702	3192	2996	2166	2252	2314

Tabell 7.8: Antall TEU over etterspørsel sendt i uke 12-13 og 14-15, AsymmetriskPolicy

Kapittel 8

Diskusjon

I diskusjonen skal vi gå igjennom resultatene og trekke røde linjer mellom hva resultatene våre viser i forhold til tomme-vogner problemet. Vi skal også besvare problemstillingen og forskningsspørsmålene. Til slutt skal vi gå igjennom videre forskning på temaet, og hvordan modell kan utvides for å bli enda bedre.

8.1 Diskusjon

Frem til nå har vi presentert resultatene vi har kommet frem til, samt kommentert på aspekter vi synes det har vært viktig å belyse. I dette delkapitlet skal vi sette dette i sammenheng med informasjon gitt tidligere i oppgaven, for å se om det kan være likheter eller ulikheter.

Med tallene presentert i Tabell 7.2.1 og Tabell 7.2.2 ser vi en trend på at CargoNet opererer med et betydelig overskudd på vogn. På det høyeste trenger CaroNet 635 vogner, med utgangspunkt i SymmetriskPolicy optimert. På det laveste, med utgangspunkt i AsymmetriskPolicy optimert, vil behovet være nede på 432 vogner. Trenden viser på generell basis at SymmetriskPolicy gir et høyere antall total vogn, som kan indikere at ved effektiv vognallokering vil de kunne redusere vognparken sin. Videre kommer vår modell bedre ut på nesten samtlige scenarioer, og har en gjennomsnittlig besparelse på 57 vogner i snitt.

Ser vi dette i sammenheng med Holmberg et al. [1998], så virker det reelt at CargoNet på generell basis opererer med et for høyt tall vogner. Artikkelen konkluderer med at deres modell kan bli brukt for å optimalisere vognbruken, og resultatene de viser til senker total kostnad ved bedre distribusjon av vogner. Videre skriver de i konklusjonen at modellen de utviklet bidro til at Statens Järnvagnar i Sverige startet prosessen med å utvikle et nytt system, for bedre distribusjon av tomme vogner. Dette er spesielt relevant for oppgaven vår, da vi også ser for oss at implementering av et nytt allokeringssystem kunne bedre driften til CargoNet. Likevel er det verdt å nevne at tidsantallet vi har valgt, skilles fra deres. Der de optimerer på et operasjonelt nivå over fem dager, har vi optimert på et taktisk nivå på to uker, over flere perioder, gjennom et år. Dette kan ha påvirkning på deres resultat, sammenliknet med

vårt. Uansett, bygger forskningen til Haghani [1987] oppunder at det på generell basis blant godsoperatører på jernbane, er et problem med ineffektiv bruk av vogner. Vi mener dette satt i sammenheng gir et grunnlag for at resultatene våre gir mening.

Likevel har vi fattet visse antagelser for oppgaven, som kan føre til at resultatene ikke er like virkelighetsnære som ønsket. Vi har blant annet valgt å se bort ifra reparasjoner og service, og tatt en antagelse på at det alltid er tilgang på vogn og lokomotiver. Realistisk er dette antagelser som i stor grad kan påvirke det totale antall vogn, da vedlikehold og reparasjon er store deler hverdagen til CargoNet. Forsinkelser på rutene har også blitt neglisjert, noe CargoNet har erkjent forekommer ofte i deres drift. Dette betyr at våres funn ikke direkte kan overføres til hvordan CargoNet bør sette opp, og fordele vognparken sin. Derimot kan disse resultatene være en god indikator på at det er rom for forbedring, for gitt antagelsene viser resultatene for gitte uker besparelser opp imot 50 prosent.

Resultatene gir også en klar indikasjon på at selv om CargoNet velger å fortsette med sin løsning på problemet, kan de dra nytte av ulike verktøy for effektivisering av vognbruken sin. Videre indikerer resultatene at CargoNet kan kvitte seg med de leasede 4955-vognene, da disse er betydelig mer kostbare i drift, enn egne. CargoNet på sin side har også eksplisitt ytret at dette er noe de på sikt vil redusere. Det er da gitt at historiske data på forsinkelser og reparasjon, tilsier dette.

Det er også viktig for resultatene å se de i sammenheng med tanke på kapasitet på linjene. Tar vi for oss resultatene rundt Tabell 7.7 og Tabell 7.8 for uke 12-13 og uke 14-15, viser disse at kapasiteten på linjene er noe av det som holder igjen det fulle potensialet til AsymmetriskPolicy. Vi kjenner fra Underkapittel 2.1.2 at kapasitetsproblemer og ulykker/vedlikehold på linjene er et reelt problem, og vi antar at dette påvirker virkelighetsnærheten til modellen. Det er ikke sikkert at våre funn kan bli implementert, gitt de kapasitetene CargoNet jobber ut ifra. Heldigvis på den andre siden, så vi i Underkapittel 2.3.2 at planen fremover er kapasitetsforbedringer. Selv om dette er langsiktige planer, kan det på sikt bety at CargoNet kan sende flere tomme vogner på rutene sine, og fremover vil kunne allokere vognene bedre enn hva de gjør i dag.

På bakgrunn av diskusjonen føler vi oss trygge på å kunne svare på forskningsspørsmålene og den overnevnte problemstillingen, vist i Kapittel 1. Resultatene fra Tabell 7.3 og Tabell 7.1 viser begge at CargoNets nåværende løsning ikke er den mest optimale. Selv om det er klart at den eksisterende løsningen kan forbedres, indikerer resultatene i Tabell 7.5 at selve gjennomføringen heller ikke er den mest optimale. Da AsymmetriskPolicy kommer bedre ut med et gjennomsnittlig forbedring på 6 prosent. Det kan også se ut som at både SymmetriskPolicy og AsymmetriskPolicy favoriserer vogn 4955, over 4432 i Figur 7.1. Ettersom CargoNet allerede har flere 4495 enn 4432, virker det som dette er noe de allerede er klar over. Funnene tilsier likevel at i alle scenarioene untatt ett, kan CargoNet kvitte seg med de leasede vognene, da det er tilstrekkelig med de egne 4495. Til slutt, når det gjelder det siste forskningsspørsmålet mener vi at vår forskning er tilstrekkelig for å konkludere med at CargoNet vil tjene på å sende flere vogner, utover det etterspørselen tilsier. Vi ser at dette kan være en nøkkelfaktor for CargoNet til å benytte vognparken sin bedre.

Avslutningsvis, basert på de besvarte forskningsspørsmålene kan CargoNet ved bruk av effektiv vognallokering på taktisk nivå, redusere den totale vognparken sin.

8.2 Videre arbeid og forskning

I dette delkapittelet vil vi utforske videre forskningsmuligheter basert på funnene fra vår studie om vognallokering hos CargoNet. Disse forskningsområdene vil ikke bare styrke CargoNets strategiske og operative beslutninger, men også bidra til en mer bærekraftig og effektiv bruk av jernbanenettverket i Norge.

8.2.1 Utvidelse og forfining av modellen

Fremtidig forskning bør fokusere på å forbedre den nåværende modellen ved å inkorporere flere detaljer og variabler som påvirker togoperasjoner, inkludert værforhold og trafikkforstyrrelser. Dette vil tillate mer realistiske simuleringer og mer presise forutsigelser. Videre bør modellen utvikles for å håndtere usikkerheten i etterspørselen og tilgjengeligheten av vogner ved å integrere stokastiske elementer. Dette kan inkludere scenariobasert planlegging som tillater sann-tidsjusteringer basert på oppdatert informasjon. En slik tilnærming bør også utvide modellens målsetninger for å omfatte kostnadseffektivitet, pålitelighet og miljøpåvirkning, noe som krever bruk av multi-kriterieoptimeringsmetoder.

8.2.2 Implementering av sikkerhetsmarginer

Det er essensielt å undersøke potensialet og effekten av å implementere sikkerhetsmarginer i vognallokeringen. Dette innebærer å fastsette den optimale størrelsen på sikkerhetsmarginer som balanserer risikoen for både overskudd og underskudd av vognkapasitet. Forskingen skal evaluere hvordan disse sikkerhetsmarginene påvirker kostnadene og operasjonell effektivitet, spesielt i lys av CargoNet's kapasitet til å selge containerplasser frem til tre timer før avreise.

8.2.3 Teknologiske investeringer

En annen viktig forskningsretning er evalueringen av avanserte teknologiske løsninger som kan forbedre vognallokeringen. Dette inkluderer utvikling av sporings- og informasjonssystemer som gir realtidsdata om vognenes posisjon og status. Videre bør potensialet for automatiserte og AI-drevne planleggingsverktøy utforskes, noe som kan forbedre nøyaktigheten i prognoser og optimalisere bruk av tomme vogner. Dette vil også omfatte integrasjon av maskinlæringsteknikker for å forutse etterspørselsmønstre mer nøyaktig.

8.2.4 Økt kapasitet på jernbanenettverket

Studier bør gjennomføres for å vurdere de potensielle effektene av økt kapasitet i jernbanenettverket, som foreslått i Nasjonal Transportplan. Forskingen skal analysere hvordan infrastrukturforbedringer, som nye spor og oppgraderte terminaler, påvirker effektiviteten og kapasiteten i godstransporten. Det er også viktig å undersøke samspillet mellom fysiske kapasitetsøkninger og forbedrede allokeringsteknikker for å maksimere fordelene av investeringene.

8.2.5 Integrert informasjonssystem

Forskning bør også fokusere på utviklingen av et integrert informasjonssystem som kan samle og analysere data på tvers av terminaler. Studien skal utforske design av systemarkitektur og optimalisering av dataflyt for å støtte effektiv og nøyaktig beslutningstaking. Videre bør effekten av bedre informasjonsflyt på planlegging og gjennomføring av vognallokeringer evalueres, for å se hvordan dette kan forbedre den generelle operasjonelle effektiviteten.

Kapittel 9

Konklusjon

I denne bacheloroppgaven har vi adressert problemet med ineffektiv vognallokering hos CargoNet. Målet var å redusere antall overflødige vogner for å minske operasjonelle kostnader uten å kompromittere servicekvaliteten. Ved å anvende en matematisk modell og analysere historiske data, utviklet vi en løsning som teoretisk tar for seg disse utfordringene.

Vårt hovedbidrag er utviklingen av en optimeringsmodell i Excel, som demonstrerer hvordan teoretiske modeller kan tilpasses og anvendes på praktiske problemstillinger i jernbanesektoren. Modellen viser at gjennom strategisk allokering av vogner kan CargoNet potensielt redusere antallet overflødige vogner med opp til 32 prosent. Dette representerer betydelige kostnadsbesparelser og mer effektiv bruk av ressurser.

Betydningen av resultatene er signifikant for CargoNet, da de gir et klart bilde av hvordan en mer målrettet vognallokering kan forbedre både økonomien og utnyttelsen av vognparken. Vi har, i likhet med Holmberg et al. [1998], bevist at det er mulig for CargoNet å redusere vognparken uten at det teoretisk sett skal gå på bekostning av servicegraden. Dette representerer en direkte kostnadsbesparelse og effektiviseringsgevinst for CargoNet. Implementering av vår optimeringsmodell vil kunne føre til signifikante besparelser i kapitalkostnader, samtidig som en mer bærekraftig utnyttelse av vognparken. Dette støtter selskapets mål om bærekraft og effektivitet.

Studien har svart på de oppsatte forskningsspørsmålene ved å demonstrere hvordan den utviklede modellen kan optimere vognbruken og redusere kostnadene forbundet med overflødige vogner. Vi har skapt en tilnærmet realistisk modell for CargoNet, selv om visse antagelser om driftsforhold må testes ytterligere for å sikre realismen i modellens anvendelse. Lærdommen her er tydelig: Selv med komplekse systemer som jernbanetransport, kan datadrevne modeller yte betydelige bidrag til effektivisering og kostnadsreduksjoner.

Gjennom denne prosessen har vi opplevd en betydelig læringskurve innen optimeringsteorier, modelleringsteknikker, og vitenskapelig skriving. Vi har også forbedret vår forståelse av praktiske utfordringer i logistikkbransjen, noe som vil være verdifullt i vår videre karriere.

For videre forskning anbefales det å utforske modellens robusthet under forskjellige driftsscenarioer og integrere realtidsdata for bedre å håndtere dynamiske endringer i både etterspørsel og tilgjengelighet av vogner. Det vil også være nyttig å vurdere miljøpåvirkningen av optimalisert vognallokering, et viktig aspekt for fremtidens bærekraftige logistikkoperasjoner.

Bibliografi

- BaneNOR (a). Jernbanenettet i norge. URL: <https://www.jernbanedirektoratet.no/jernbanen-i-norge/jernbanenettet-i-norge/>.
- BaneNOR (b). Store krav til utslippskutt – vi må satse på jernbane. URL: <https://www.banenor.no/nyheter-og-aktuelt/nyheter/2022/store-krav-til-utslippskutt--vi-ma-satse-pa-jernbane/>.
- BaneNOR (2024a). I år styrker vi jernbanen for 28 milliarder, . URL: <https://www.banenor.no/nyheter-og-aktuelt/nyheter/2024/i-ar-styrker-vi-jernbanen-for-28-milliarder/>.
- BaneNOR (2024b). Jernbanen prioriteres i ny nasjonal transportplan, . URL: <https://www.banenor.no/nyheter-og-aktuelt/nyheter/2024/jernbanen-prioriteres-i-ny-nasjonal-transportplan/>.
- Birkemo (). Nmj topline cargonet lgns 42 76 443 2082-7, pepsi max/bring. URL: <https://birkemo.no/hobby/modelltog/vogner/godsvogner/nmj-topline-cargonet-lgns-42-76-443-2082-7-pepsi-max-bring/>.
- CargoNet (). Cargonet. URL: <https://www.finn.no/job/employer/company/195>.
- CargoNet (2024). Presentasjon cargonet. PowerPoint-presentasjon.
- Cordeau, J.-F., Toth, P., & Vigo, D. (1998). A survey of optimization models for train routing and scheduling. *Transportation Science*, Pages 380-404. URL: <https://pubsonline.informs.org/doi/epdf/10.1287/trsc.32.4.380>. doi:10.1287/trsc.32.4.380.
- Cornaro, A., & Frechi, D. (2023). Evaluation of railway systems: A network approach. *Sustainability*, . URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/10/8056>.
- Crainic, T. G., & Laporte, G. (1997). *Planning models for freight transportation*. Technical Report. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221796002986>. doi:10.1016/S0377-2217(96)00298-6.
- Crainic, T. G., & Roy, J. (1988). Or tools for tactical freight transportation planning. *European Journal of Operational Research*, Volume 33, Issue 3, Pages 290-297. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0377221788901725?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=879d1bb1c85bb4f1. doi:10.1016/0377-2217(88)90172-5.

-
- Garrisi, G., & Cervelló-Pastor, G. (2019). Train-scheduling optimization model for railway networks with multiplatform stations. *Sustainability*, . URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/1/257>.
- Haghani, A. E. (1987). Rail freight transportation: A review of recent optimization models for train routing and empty car distribution. *Journal of Advanced Transportation*, *21*, 147–172. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/atr.5670210205>. doi:10.1002/atr.5670210205.
- Helle, K.-E. (2019). Klimagassutslippet fra ulike reisemåter, . URL: <https://www.framtiden.no/tips/klimagassutslippet-fra-ulike-reisemaater>.
- Holmberg, K., Joborn, M., & Lundgren, J. T. (1998). *Improved Empty Freight Car Distribution*. Technical Report 2. URL: <https://pubsonline.informs.org/doi/epdf/10.1287/trsc.32.2.163>. doi:10.1287/trsc.32.2.163. arXiv:<https://doi.org/10.1287/trsc.32.2.163>.
- Jernbanedirektoratet (2022). *Tall og fakta om jernbanen*. Technical Report. URL: <https://www.jernbanedirektoratet.no/jernbanen-i-norge/tall-og-fakta-om-jernbanen/>.
- Liebchen, C., & Rolf, M. H. (2007). *The Modeling Power of the Periodic Event Scheduling Problem: Railway Timetables - and Beyond*. Technical Report TU Berlin, Institut für Mathematik.
- Lovdata (2021). Forskrift om togframføring og tilhørende tjenester på det nasjonale jernbanenettet. URL: https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2021-06-30-2315/KAPITTEL_1#KAPITTEL_1.
- Lu, Y., & Wang, S. (2022). Optimization of joint decision of transport mode and path in multi-mode freight transportation network. *Sensors*, . URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/13/4887>.
- Lusby, R., Larsen, J., & Bull, S. (2017). *A survey on robustness in railway planning*. Technical Report.
- Oliveira, E., & Smith, B. (2000). A job-shop scheduling model for the single-track railway scheduling problem, . URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=40297f13210d8017d65df39d2aa8e72c55d7d1ea>.
- Samferdsesdepartementet, D. K. (2024). Nasjonal transportplan 2025–2036, . (p. 148). URL: <https://www.regjeringen.no/contentassets/aeee20cf5a9e468ea97fd51638c42407/no/pdfs/stm202320240014000dddpdfs.pdf>.
- Solvoll, G. (2005). Nasjonal transportplan i store norske leksikon, . URL: https://snl.no/Nasjonalt_transportplan.
- SSB (2022). *SSB data*. Technical Report. URL: <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/handlingsplan-for-infrastruktur-for-alternative-drivstoff-i-transport/id2662448/>.

VisitNorway (). Bli med på noen av verdens vakreste togreiser. URL: <https://www.visitnorway.no/planlegg-reisen/transport/tog/vakre-togturer/>.

Wisting, T. (2005). *Jernbane i Store norske leksikon*. Technical Report. URL: <https://snl.no/jernbane>.

Xin, X. (2022). Service network design for freight railway transportation: The chinese case, . URL: <https://journals.plos.org/plosone/article/authors?id=10.1371/journal.pone.0276671>.

