

Ingvild Moltzau Myhre

Varedistribusjon med lastesykler i byområder - modellering av rutevalg

En case-studie i Trondheim

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk

Veileder: Kelly Pitera, Yngve Karl Frøyen

Juni 2020

Ingvild Moltzau Myhre

Varedistribusjon med lastesykler i byområder - modellering av rutevalg

En case-studie i Trondheim

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk
Veileder: Kelly Pitera, Yngve Karl Frøyen
Juni 2020

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for bygg- og miljøteknikk



Kunnskap for en bedre verden

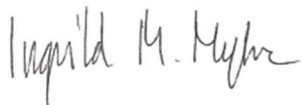
Forord

Denne masteroppgaven er skrevet av Ingvild Moltzau Myhre og utgjør den avsluttende delen av det toårige masterprogrammet, Bygg- og Miljøteknikk, innenfor studieretningen veg, transport og geomatikk ved Norges Teknisk-naturvitenskaplige universitet, NTNU. Oppgaven er skrevet i løpet av vårsemesteret i 2020, fra januar til juni, og består av 30 studiepoeng.

Tema for oppgaven omfatter bruken av lastesykler i urban varedistribusjon. Temaet er utforsket ved tilgjengelig litteratur på området, og ved en rutevalgmodell utviklet i arbeidet med oppgaven som simulerer varelevering med lastesykkel og varebil. Dette har gitt et grunnlag til å kunne utforske effekten av å ta i bruk lastesykler i urban varedistribusjon.

En stor takk rettes til veileder Kelly Pitera ved NTNU for å ha introdusert meg for tema for oppgaven, og god kontinuerlig veiledning underveis med arbeidet. Det rettes også en stor takk til veileder Yngve K. Frøyen ved NTNU for god hjelp, spesielt i utvikling av rutevalgmodell og arbeid med data benyttet i forbindelse med denne.

Trondheim, 24 juni 2020



Ingvild Moltzau Myhre

Sammendrag

Lastesykkel er et transportmiddel som har økende popularitet, og bruken av det har også begynt å bli mer vanlig i varetransport. Urbane områder er i dag preget av et økende behov for varetransport. Dette fører til en stor andel større kjøretøy i disse områdene, som igjen påvirker forurensning, lokale utslipp, trafiksikkerhet og problemer omhandlende bylogistikk. Lastesykler er ansett som et alternativ til den tradisjonelle vareleveransen med biler og større kjøretøy, og kan bidra til å minske de nevnte utfordringene. Studier av bruken av lastesykler er ofte sett i sammenheng med etableringen av sentrale depot eller terminaler og er i stor grad erfaringsbasert arbeid. En annen synsvinkel i vurderingen av lastesykler er forstudier, der det gjerne blir utført case-studier på bestemte lokasjoner. Hensikten med denne oppgaven var å utarbeide en rutevalgmodell som simulerer varelevering med ulike kjøretøy. Resultatene fra disse simuleringene sammen med kunnskap innhentet fra studier av bruken av lastesykler i urban varedistribusjon bidrar til å kunne diskutere hvordan lastesykler kan implementeres i varedistribusjon.

Rutevalgmodellen er utviklet i ArcMap. I ArcMap benyttes et integrert Vehicle Routing Problem (VRP) verktøy. VRP er et optimaliseringsproblem, som benyttes for å finne optimale ruter for en kjøretøysflåte under betingelser om at et vare- eller godskvantum skal leveres eller samles inn. I simuleringene er det benyttet leveransedata gitt av Posten AS, denne er bearbeidet for å kunne benyttes i oppgaven. Arbeidet med rutevalgmodellen og dataen som er benyttet i denne er i stor grad en del av formålet med oppgaven.

Det er utført simuleringer av fem scenarier, hvorav to benytter lastesykkel og tre benytter varebil med ulike forutsetninger. Fra disse simuleringene er det hentet ut resultater som er benyttet til å diskutere implementering av lastesykler i urban varedistribusjon. Funn fra scenariene viser at lastesykler har muligheten til å levere en stor andel av leveranser i et bysentrum. Resultatene indikerer at dette ikke går ut over tidsbruk og leveringsevne. Lastesykler har ikke muligheten til å håndtere alle typer leveranser og kombinasjon av lastesykler og varebiler er nødvendig. Den prosentvise forflytningen fra varebil over til lastesykkel vil være avgjørende med tanke på behovet for ulike kjøretøy.

Lastesykkel og varebil har mange ulikheter. En vesentlig forskjell er hastighet og kapasitet. Hastighetsforskjellen mellom biler og lastesykler gir ikke så store utslag i tidsbruk innad i et bysentrum når avstander som tilbakelegges er relativt små, og hastigheten for bil er begrenset slik som i urbane områder. Kapasiteten for en lastesykkel er rundt 10 – 20% av en varebils. Dette gir et behov for påfyll av varer fra et depot flere ganger i løpet av en arbeidsdag. Turene til depot bidrar til at lastesykler tilbakelegger en lengre reisevei i løpet av en dag. Et sentralt depot minimerer tiden benyttet for å utføre denne oppgaven, og er også et sted som kan fungere som arbeidssted, oppholdsplass ved pauser, serviceområdet for kjøretøy og omlastningspunkt fra større til mindre kjøretøy. Lastesykler har også fordeler sett opp mot leveranse med varebil som påvirker tiden brukt på hver leveranse. Dette er den mest tidskrevende oppgaven i leveringsprosessen. Fra data benyttet i denne oppgaven er det vist at lastesykler er opp til flere minutter raskere for hver leveranse sammenlignet med varebiler.

En rutevalgmodell slik som utviklet i denne oppgaven kan gi god innsikt i evaluering av nye løsninger, på en effektiv og fleksible måte. Lastesykler kan være en av mange nye løsninger som kan bidra til mer bærekraftig urban vareleveranse. Lastesykler er en effektiv og miljøvennlig leveransemetode som kan bidra til mindre trafikk i urbane områder, som igjen har positive ringvirkninger.

Summary

Cargo bikes are a means of transport that is gaining popularity, and its use has also become more common in goods transport. Urban areas are today characterized by a growing need for goods transport. This leads to a large proportion of larger vehicles in these areas, which in turn affect pollution, local emissions, traffic safety, and problems related to urban logistics. Cargo bikes are considered an alternative to traditional goods delivery with cars and larger vehicles and can help to reduce the aforementioned challenges. Studies of the use of cargo bikes are often seen in connection with the establishment of central depots or terminals and are largely experience-based work. Another point of view in the assessment of cargo bikes is preliminary studies, where case studies are often carried out at specific locations. The purpose of this assignment was to develop a route selection model that simulates the delivery of goods with different vehicles. The results of these simulations, together with the knowledge gained from studies of the use of cargo bikes in urban goods distribution, help to discuss how cargo bikes can be implemented in goods distribution.

The route selection model is developed in ArcMap. Within ArcMap an integrated Vehicle Routing Problem (VRP) tool is used. VRP is an optimization problem, which is used to find optimal routes for a vehicle fleet under conditions that a quantity of goods must be delivered or collected. In the simulations, delivery data is provided from Posten AS, which has been processed in order to be used in the thesis. The work with the route selection model and the data used in it is largely part of the purpose of this task.

Simulations of five scenarios have been carried out, two of which use cargo bikes and three use vans with different conditions. From these simulations, results have been obtained that are used to discuss the implementation of cargo bikes in urban goods distribution. Findings from the scenarios show that cargo bikes have the ability to deliver a large proportion of deliveries in an urban center. The results indicate that this does not affect time and delivery ability. Cargo bikes do not have the ability to handle all types of deliveries and a combination of cargo bikes and vans is necessary. The percentage transfer from van to cargo cycles will be decisive in view of the need for different vehicles.

Cargo bikes and van have many differences. A major difference is their speed and capacity. The speed difference between cars and cargo bikes does not produce as much impact on time spent in an urban center when distances traveled are relatively small and the speed of cars is limited as in urban areas. The capacity of a cargo bike is around 10 - 20% of a van. This creates a need for replenishment of goods from a depot several times during a working day. The trips to the depot cause cargo bikes to travel longer within a day. A central depot minimizes the time used to perform this task and is also a site that can serve as a place of work, a place of residence during breaks, the service area for vehicles, and transshipment points from larger to smaller vehicles. Cargo bikes also have advantages over delivery with vans that affect the time spent on each delivery. This is the most time-consuming task in the delivery process. From the data used in this thesis, it has been shown that cargo bikes are up to several minutes faster for each delivery than vans.

A route selection model such as developed in this thesis can provide good insight into the evaluation of new solutions in an efficient and flexible way. Cargo bikes can be one of many new solutions that can contribute to more sustainable urban delivery. Cargo bikes are an efficient and environmentally friendly method of delivery that can contribute to less traffic in urban areas, which in turn has positive ripple effects.

Innholdsfortegnelse

Forord	I
Sammendrag	II
Summary	III
Innholdsfortegnelse	IV
Figurliste	VI
Tabelliste.....	VI
1. Introduksjon	1
1.1. Formål	2
1.2. Struktur	3
2. Teori	4
2.1. Lastesykler i varedistribusjon.....	4
2.2. «Vehicle routing problem»	8
3. Data og metode.....	10
3.1. Oppbygging av rutevalgsmo de ll	11
3.1.1. Studieområder.....	11
3.1.2. Oppbygging av nettverkene.....	12
3.2. Leveransedata	14
3.2.1. Behandling av leveransedata	14
3.2.2. Karakteristikk av leveransedata	16
3.3. Kjøretøysdata	19
3.4. Utførelse av Vehicle Routing Problem i ArcMap	22
3.4.1. Behandling av resultater fra VRP	23
3.5. Behovsundersøkelse	23
3.6. Scenarier	25
4. Resultat.....	29
4.1. Sum	31
4.2. Gjennomsnitt.....	32
5. Diskusjon.....	34
5.1. Utvikling av rutevalgsmo de llen.....	34
5.1.1. Inputdata – påvirkning av resultat.....	34
5.1.2. Bruk av ArcMap som simuleringsverktøy	35
5.1.3. Behandling av ikke-systematisert data	36
5.2. Implementering av lastesykler i urban varedistribusjon.....	37
5.2.1. Sammenligning av varebiler og lastesykler	37
5.2.2. Effekt av type lastesykkel.....	40
5.2.3. Effekten av mindre gunstige forhold for motoriserte kjøretøy i urbane områder	41

5.2.4. Kostnader	41
5.2.5. Depotets funksjon og betydning	42
6. Videre arbeid	44
7. Konklusjon	46
Litteraturliste	47
Vedlegg 1: Kode Access	50
Vedlegg 2: Nettverk Trondheim sentrum	51
Vedlegg 3: Eksempel leveransedata	53
Vedlegg 4: Ordre etter depotbesøk, scenario 2, 22. januar	54
Vedlegg 5: Resultater scenario 1-5	55
Vedlegg 6: Følgerev masteroppgave 2020	62

Figurliste

Figur 1: Fra varebil til lastesykkel (Illustrasjon: Ingvild M. Myhre)	4
Figur 2: Konsept for varelevering med varebiler og lastesykkler (Ørving et al., 2018, s. IV)	5
Figur 3: Illustrasjon av «Vehicle Routing Problem» (illustrasjon: Ingvild M. Myhre, inspirert av figur 3.4 (Toth og Vigo, 2002, s. 73)).....	9
Figur 4: Prinsippskisse for arbeid med rutevalgsmoell.....	10
Figur 5: Oversiktskart Trondheim (Vegkart)	12
Figur 6: Sykkelhastighet i forhold til helning (Andreassen, 2003).....	13
Figur 7: Geometrisk tyngdepunkt av adressepunkter	16
Figur 8: Postnummer for leveransedata, fra øverst til venstre; postnummer 7010, 7011, 7012 og 7013 Trondheim, Skjerm bilde Google Maps	17
Figur 9: Fordeling av volm på pakker	18
Figur 10: Fordeling av vekt på pakker	18
Figur 11: Vekt – volum.....	19
Figur 12: Lokasjon for depot, med utklipp fra sykkelnettverk (øverst t.h.) og bilnettverk (nederst t.h.) (Vegkart).....	20
Figur 13: Illustrasjon av VRP i ArcMap.....	23
Figur 14: Stengte gater i scenario 5	28

Tabelliste

Tabell 1: Oversikt simuleringsstudier	6
Tabell 2: Adresse fra adressematrikkel	15
Tabell 3: Kodet leveranseadresse	15
Tabell 4: Parametere for leveranse med lastesykkel.....	20
Tabell 5: Parametere for leveranse med motoriserte kjøretøy	21
Tabell 6: Inputdata, behovsundersøkelse.....	24
Tabell 7: Resultat, behovsundersøkelse	25
Tabell 8: Kjøretøy benyttet i scenarier.....	26
Tabell 9: Karakteristikk leveranser, 5 dager	26
Tabell 10: Resultat scenarier, sum.....	31
Tabell 11: Resultat scenarier, gjennomsnitt	32
Tabell 12: Prosentvis fordeling av tidsbruk.....	38

1. Introduksjon

Lastesykkelen har eksistert siden slutten av 1800-tallet, men bruken av den som transportmiddel for både varer og mennesker har hatt en betydelig økning de siste årene. Den mer moderne varianten av lastesykkelen, som regel elektrisk assistert gir nye muligheter. Spesialdesignede lastesykler til bruk i varetransport kan være et godt alternativ for vareleveranse i urbane områder og er i dag benyttet i mange byer. Utfordringene som oppstår i bysentrum, gir grunnlag for å søke etter nye typer løsninger. Lastesykler kan blant annet bidra med å erstatte og minske bruken av større kjøretøy, redusere klimagassutslipp, minske lokal forurensing, frigi arealer til varebiler som ikke kan erstattes, bedre trafiksikkerheten og effektivisere vareleveringsprosessen. (Rundberget *et al.*, 2016; Maes og Vanelslander, 2012; Hofmann *et al.*, 2017; Kirkels, 2016).

Byer er en viktig del i den lokale og globale økonomien. I dag lever over 50% av verdens befolkning i tettsteder og byer, i Europa og Nord-Amerika gjelder det over 80% av befolkningen, denne fortetningen er antatt å øke. Urban varetransport står for mange av reisene innenfor et bysentrum, og økende populasjon og vekst i økonomien i disse områdene bidrar til videre vekst i behovet for urban varetransport (Barone og Roach, 2016; SSB, 2019). Utfordringer omhandlende bylogistikk, klimagassutslipp, støy, lokal forurensning og trafiksikkerhet som alle påvirkes av et økende behov for urban varetransport peker mot et behov for nytenkning. Dette fører til at nye typer løsninger blir mer aktuelle, samt optimalisering av eksisterende løsninger (Rundberget *et al.*, 2016; Maes og Vanelslander, 2012). Varetransport er en viktig del av bylogistikken, og gode, bærekraftige løsninger for varetransporten som bidrar til bedre bysentrum kan påvirke utviklingen av urbane områder. Utfordringer som gjelder bylogistikk omhandler blant annet parkering, lasting og lossing av varer og trafiksikkerhet. Tilretteleggingen for varetransport i byområder er generelt ikke bra nok, og det er manglende kompetanse på hvordan man tar hensyn til varelevering i areal- og gatebruksplaner. Parkering, lasting og lossing er et annet problem. Lastesoner blir ofte nedprioritert til fordel for andre trafikkgrupper som kollektivtransport. Utformingen kan være lite tilrettelagt og losse- og lastelommer kan ofte ha flere målgrupper og kan være hyppig okkupert av andre brukere. Rundt områder for vareleveranse vil trafiksikkerhet også være viktig, spesielt i områder hvor barn ferdes (Fosshem *et al.*, 2019).

I de senere årene har lastesykler blitt mer populære, også i varetransport. Studier av bruken av lastesykler er ofte sett i sammenheng med etableringen av sentrale depot eller terminaler og er i stor grad erfaringsbasert arbeid. Her blir erfaringer fra både det private og offentlige evaluert og erfaringer blir videreført fra prosjekt til prosjekt innenfor og over landegrensene. Transportører som har tatt i bruk lastesykler i varedistribusjon har varierende erfaringer om blant annet effektivitet, lønnsomhet og ringvirkninger på bymiljø (Ørving *et al.*, 2018; Øvring og Eidhammer, 2019; Schliwa *et al.*, 2015; Tale *et al.*, 2018). En annen synsvinkel i vurderingen av lastesykler er studier som ser på lastesykler før de er tatt i bruk, hvor det gjerne blir utført case-studier på bestemte lokasjoner. I denne oppgaven er disse studiene beskrevet som forstudier. Med en forstudie som sammenligner ulike kjøretøy og sammensetninger kan bruken av lastesykler studeres før de er tatt i bruk. Med modeller laget i en case-studie kan man ha muligheten til å endre parameter og legge inn restriksjoner på f.eks. kapasitet og fremkommeligheten til varebiler og lastesykler i bysentrum. For kommersielle firma er det ofte krav omhandlende økonomi eller andre fordeler for å ha et ønske om å ta i bruk nye løsninger som lastesykkelen. Å velge å endre måten leveranser blir utført på kan være både tidkrevende og risikofyllt. Dette kan slike studier bidra til å forenkle, ved å gi datagrunnlag til avgjørelser om slike tiltak er gode, og hvordan de bør løses. Forstudier

kan også bidra offentlige myndigheter ved å teste og illustrere tiltak som ønskes gjennomført, og kan bidra til bedre beslutningsgrunnlag. Teori omhandlende lastesykkel vil videre bli mer diskutert i teorikapittelet (Fikar, Hirsch og Gronalt, 2018).

1.1. Formål

Formålet med masteroppgaven er å modellere en rutevalgmodell som kan brukes til å illustrere hvordan lastesykler kan bli brukt i varedistribusjon i bysentrum.

Rutevalgmodellen skal simulere bruken av lastesykler, ved bruken av et ruteverktøy som er bygget på en nettverksmodell. Modellen skal modelleres i ArcMap, og det skal testes ulike scenarier for hvordan lastesykler kan brukes i kombinasjon med et bylogistikkdepot.

Ved å teste ulike scenarier i modellen skal en kunne sammenligne bruken av lastesykkel og større kjøretøy i varedistribusjon. Et mål med arbeidet er å innhente kunnskap og verdier som er så realistiske som mulig for å kunne utføre simuleringer slik at fremstillingen og sammenligningen mellom ulike scenarier er reelle.

Dette kan gi en bedre forståelse på hvordan lastesykler kan benyttes i varedistribusjon i kombinasjon med et bylogistikkdepot. Det skal også undersøkes hvordan ulike parameter påvirker bruken av lastesykler. For eksempel hvordan ulike parametere som lastekapasitet, gjennomsnittshastighet, fremkommelighet og tid per leveransestopp påvirker effektiviteten til en lastesykkel opp mot bruken av større kjøretøy. Case studiet i oppgaven er lokalisert til Trondheim sentrum.

Videre kan modellen brukes til å besvare andre spørsmål knyttet til bruken av lastesykler i varetransport.

Formålet er utarbeidet underveis med arbeidet av et forprosjekt utført høsten 2019 og i arbeidet med masteroppgaven. Utgangspunktet for oppgaven kommer fra forslag til oppgaver presenter av veileder Kelly Pitera, og er som følger:

*"As our cities continue to grow and nullvekts goals increase the numbers of pedestrians, cyclists, and buses in the streets, more and more pressure is put on trucks moving through and delivering in urban spaces. Research topics within this theme could include modelling the impact of road/route restrictions, considering how roads and streets could be designed better to allow for safe and efficient delivery of goods, **or investigating how micro terminals could be used close to the city center to facilitate goods delivery (including by bicycle).**"*

Fra dette er fokusområdet i oppgaven hentet: lastesykler i urban varedistribusjon. Videre er det presentert de endelige hovedmålene med oppgaven.

- Utvikle en rutevalgmodell som benytter realistiske verdier for å sammenligne bruken av lastesykkel og bil/varebil i varedistribusjon.
- For å illustrere hvordan modellen kan benyttes skal ulike scenarier simuleres hvor lastesykkel og varebil benyttes. Resultatene skal brukes for å sammenligne ulike leveransemetoder med ulike forutsetninger.

Dette blir utført ved å se på vareleveranser i Trondheim sentrum, som en case-studie. Data som er benyttet er lagt inn for å direkte kunne sammenligne ulike forutsetninger og kjøretøy. Dataen som er innhentet er bearbeidet, og etterstrebet å kunne gi et så godt og realistisk sammenligningsgrunnlag som mulig.

Resultatene fra disse simuleringene sammen med kunnskap innhentet fra andre studier bidrar til å kunne diskutere bruken av lastesykler i urban varedistribusjon.

1.2. Struktur

Opgaven består av sju kapitler samt litteraturliste og vedlegg. Presentasjon og en kort beskrivelse av hvert enkelt kapittel følger.

Kapittel 1. Introduksjon

Introduksjon for bakgrunn, motivasjon og formål med denne oppgaven.

Kapittel 2. Teori

I kapitlet sees det videre på temaer som er introdusert i kapittel 1. Teori omhandlede lastesykler i varedistribusjon med hovedfokus på studier som undersøker effekten av dette før det er tatt i bruk. Videre er teorien bak Vehicle Routing Problem (VRP), og bruksområder for denne presenter.

Kapittel 3. Data og metode

Data og metode kapitlet tar for seg utviklingen av rutevalgsmodellen og behandling og innhenting av data som er benyttet. Videre er Vehicle Routing Problem verktøyet som er benyttet presenter og utarbeidelsen av behov for ulike kjøretøy til de endelige scenariene.

Kapitlet er en stor del av formålet til oppgaven, omhandlede å utvikle rutevalgsmodellen og data som er benyttet i denne.

Kapittel 4. Resultat

Resultater hentet ut fra scenariene som er utført med rutevalgsmodellen. I kapitlet presenteres en enkel beskrivelse over resultatene fra de 5 scenariene som det er gjennomført simuleringer av og tabeller med resultatene.

Kapittel 5. Diskusjon

Diskusjon av hvert enkelt av hovedformålene presentert i introduksjonskapitlet. Helhetlig blir utviklingen av rutevalgsmodellen diskutert, samt resultater fra scenariene og bruken av lastesykler i urban varedistribusjon.

Kapittel 6. Videre arbeid

Overordnet presentasjon av videreføring av data og modell utviklet i denne oppgaven som en helet eller delvis. Dette omfatter videre arbeid omhandlende bruken av lastesykler i varedistribusjon, og bruken av rutevalgsmodellen og data som er innhentet og bearbeidet til dette eller til andre hensikter.

Kapittel 7. Konklusjon

Presentasjon av de viktigste funnene gjort i denne studien.

2. Teori

Temaet for oppgaven er bruk av lastesykler i varedistribusjon og hvordan man kan se på effekten av implementering før det er realisert. Hensikten med dette kapittelet er å gi en oversikt over studier som ser på dette, samt å gi en forståelse for teorien bak en del av metoden som benyttes i simuleringen som skal utføres, kjent som «The Vehicle Routing problem»

2.1. Lastesykler i varedistribusjon

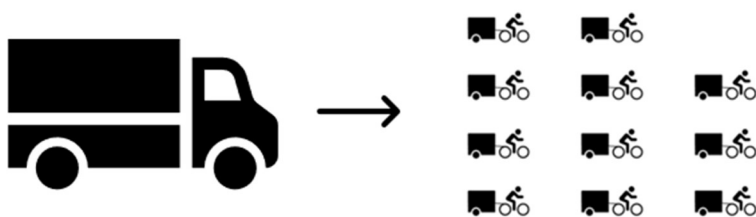
I dette delkapittelet sees det på introduserende litteratur om lastesykler og implementering av de i varedistribusjon. Videre er hovedfokuset på simuleringstudier med lastesykkel i varedistribusjon

Bruken av lastesykkel i urban transport er av økende interesse. I kommersiell sammenheng kan det endre hvordan varer leveres rundt i urbane områder. Lastesykler kan blant annet bidra med å erstatte og minske bruken av større kjøretøy, redusere klimagassutslipp, minske lokal forurensing, frigi arealer til varebiler som ikke kan erstattes, bedre trafiksikkerheten og effektivisere vareleveringsprosessen. (Rundberget *et al.*, 2016; Maes og Vanelander, 2012; Hofmann *et al.*, 2017).

En lastesykkel, på engelsk «cargo bike», er en sykkel med plass til varer. Lastesykler er i de fleste tilfeller elektriske assisterte og kan være spesialdesignet for sin tiltenkte hensikt. I Norge er elsyklers effekt regulert etter Kjøretøyforskriften. En elsykkels hjelpemotor skal opphøre ved en hastighet på 25 km/t og ha en maksimal nominell effekt på 0,25 kW (Kjøretøyforskriften, 1994).

Designet på lastesykler varierer, og finnes i variasjoner med to til fire hjul. Lastekapasitet og vektbegrensning varierer i flere tilfeller mellom 0,4 m³ – 1 m³, og 80-300 kg. Til sammenligning kan en varebil for eksempel ha lastekapasitet på 11 m³ (Browne *et al.*, 2019, s. 180-181; Rundberget *et al.*, 2016; Ørving *et al.*, 2018, s. IV; Velvoe).

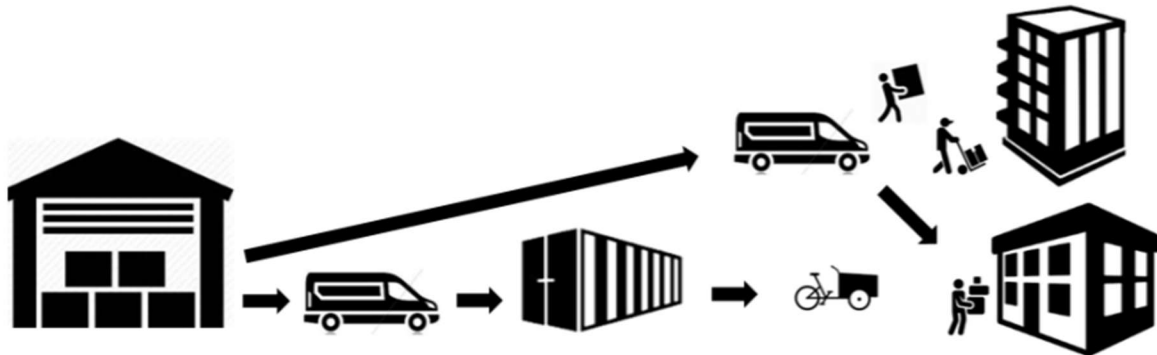
Figur 1 illustrerer den direkte sammenhengen mellom en varebil og lastesykler når det kommer til kapasitet, der man antar at varebilen har en lastekapasitet på 11 m³ og lastesyklene 1 m³.



Figur 1: Fra varebil til lastesykkel (Illustrasjon: Ingvild M. Myhre)

Bruk av lastesykkel i kommersiell sammenheng er et voksende marked, og det finnes erfaringer fra prosjekter med lastesykkel i flere europeiske byer samt i USA (Schliwa *et al.*, 2015). Prosjekter hvor lastesykkel benyttes i varedistribusjon i urbane områder er ofte i sammenheng med økt bruk og/eller etablering av en sentral terminal eller depot. Eksempler på et slikt sted for henting og lasting nært et bysentrum er urbane samleterminaler og bylogistikkdepot. Figur 2 viser forskjell på to transportkjeder, med tradisjonell transport med varebil fra terminal ut til kunde, og et eksempel hvor man har

etablert et depot for omlasting til lastesykkel før videre transport ut til kunde. Etablering av et lokalt depot eller en terminal er også et ledd som implementeres i de fleste simuleringsstudier som tar for seg bruken av lastesykkel (Rudolph og Gruber, 2017; Tale *et al.*, 2018, s. 20-23; Ørving *et al.*, 2018; Elbert og Friedrich, 2019).



Figur 2: Konsept for varelevering med varebiler og lastesykler (Ørving *et al.*, 2018, s. IV)

En samleterminal eller et bylogistikkdepot er et element i transportkjeden som kan bidra til å endre hvordan man i bysentrum leverer varer ut til kunden, sisteleddsdistribusjon. Sisteleddsdistribusjon også kjent som «last mile delivery», er vurdert som den dyreste, minst effektive og mest forurensende delen av varetransportkjeden Ved en terminal eller et depot vil gods fra en eller flere transportører lastes om fra et større til et mindre transportmiddel, og eventuelt sorteres og samlastes. Et sentralt depot eller terminal er sett på som et viktig ledd for at varelevering med lastesykler skal være gunstig. (Browne *et al.*, 2019, s. 175-176; Presttun *et al.*, 2018; Tale *et al.*, 2018).

Flere av studiene om bruk av lastesykkel i varedistribusjon ser på prosjekter hvor lastesykler er tatt i bruk. Disse prosjektene er ofte pilotprosjekt / testprosjekt hvor man ønsker å høste erfaringer, dermed blir de evaluert og erfaringer videreføres ofte til andre lignende prosjekt.

I Oslo har DHL Express utført et prøveprosjekt med lastesykkel i samarbeid med Oslo kommune Bymiljøetaten v/Sykkelprosjektet og Statens vegvesen Vegdirektoratet v/Bylogistikkprogrammet. Prosjektet benytter et mikrodepot plassert nært sentrum i Oslo hvor syklistene henter varer 1-2 ganger om dagen. DHL Express har spesialdesignede lastesykler for best mulig arbeidsforhold for deres syklistene, de er elektriske og har plass til et lasteskap på sykkelen samt en tilhenger med lasteskap. Rapporten for evaluering av prøveprosjektet trekker frem suksessfaktorer og barrierer ved bruk av lastesykler. Samarbeid og kontakt mellom offentlig sektor og næringsliv, og kontakt samt erfaringsoverføring fra logistikkaktører er et viktig grunnlag. Samt et mål og retningslinjer mot miljøvennlige løsninger.

Utfordringer omhandler plassbruk for depot, som ofte skal være sentralt hvor leiepris og tilgang på egnet området er utfordrende. For leverandør er det utfordringer rundt implementeringen, med tanke på utforming av ideelle lastesykler og få bruken av lastesykler inn i det eksisterende logistikksystemet.

I Amsterdam er det gjennomført et prosjekt hvor bedriften Post NL, som leverer og henter post, har tatt i bruk lastesykler. De har etablert 7 depot, hvor lastesykler frakter ut post til mottakere og henter inn sendt post fra postkasser. I dette tilfellet har lastesykler vist seg å være mer effektive enn varebil, en årsak til dette er spart tid ved levering av post, da lastesykler ikke har behovet for å finne tilegnede plasser slik som en varebil har. Et felles problem som begge prosjektene har sett er rekruttering av syklistene

til arbeidet. Andre erfaringer rundt bruken av lastesykler er behovet for sikring av syklene og et tilpasset navigasjonsverktøy for sykklistene, da disse har mulighet for andre veivalg enn biler (Tale *et al.*, 2018, s. 20-23; Ørving *et al.*, 2018).

En annen synsvinkel på implementering av lastesykler i varedistribusjon er forstudier som vurderer aspekter ved bruken av lastesykkel i varedistribusjon før det er tatt i bruk. Disse blir som regel utført som case-studier på bestemte lokasjoner. Slike studier ser blant annet på tidsbruk, kostnader, utslipp og effekt av lokasjon for depot og terminaler, og inkluderer ofte en sammenligning mellom varelevering med lastesykkel og tradisjonell varelevering med varebil. Studiene har ofte som hensikt å gi nyttig data i avgjørelser om implementering av lastesykler i varedistribusjon. Fordelen med disse studiene er at de kan se på bruken av lastesykler hvor det ikke er tatt i bruk, samt at det gir muligheten til å teste ulike scenarier for eksempel variasjon i kjøretøysflåten og restriksjoner i form av fremkommelighet for ulike typer kjøretøy. Ulike synsvinkler og metoder er benyttet i slike studier, og derav et ulikt fokus når det kommer til resultater (Arnold *et al.*, 2018; Hofmann *et al.*, 2017; Elbert og Friedrich, 2019).

Det er sett på fem ulike forstudier som har denne tilnærmingen til bruken av lastesykler i varedistribusjon, disse er presenter i Tabell 1. Videre er studiene mer detaljert beskrevet.

Kilde	Hensikt	Lokasjon og type distribusjon	Tiltak som blir vurdert	Verktøy
(Arnold <i>et al.</i> , 2018)	Sammenligning av ulike leveransekonsept, når en eller flere av løsningene ikke er tatt i bruk	Antwerpen, Belgia. B2C for netthandel	Lastesykkel Hentepunkt	Open Street Map
(Hofmann <i>et al.</i> , 2017)		Grenoble, Frankrike. B2B		Open street map GIS ANYLOGIC
(Fikar, Hirsch og Gronalt, 2018)	Desision suport system	Wien, Østerrike. Matlevering		Koding → AnyLogic
(Elbert og Friedrich, 2019)	Implementeringen av lastesykler i et konsolideringssystem i samarbeid mellom ulike leverandører	Frankfurt, Tyskland. B2B	Lastesykkel Konsolideringst erminaler	Open street map GIS
(Melo og Baptista, 2017)	Trafikkavvikling	Porto, Portugal. Generelt		AIMSUN

Tabell 1: Oversikt simuleringsstudier

Disse forstudiene har case-lokasjon i fem ulike europeiske byer, Antwerpen i Belgia, Grenoble i Frankrike, Wien i Østerrike, Frankfurt i Tyskland og Porto i Portugal. Ulike markedsområder som blir dekt i de ulike studiene, det er generell varedistribusjon,

matlevering, leveranser fra netthandel fra business til forbruker (B2C), business til forbruker (B2C) og business til business (B2B) med samarbeid mellom ulike leverandører. Alle studiene ser på bruken av lastesykler i varedistribusjon, men med ulike løsninger hvor nye typer løsninger som hentepunkt og konsolideringssenter også blir vurdert sammen med lastesykler. Disse blir gjerne sammenlignet med eksisterende løsninger, som leveranser med bil eller varebil. Hensikten med studiene er å se på mulighetene for bruken av lastesykler før de er tatt i bruk, samt være et verktøy som kan benyttes i avgjørelser. Studiene kan bidra for offentlige myndigheter og transportfirma til å vurdere effekten av nye tiltak. Dette omfatter blant annet økonomi, trafikk og utslipp (Arnold *et al.*, 2018; Elbert og Friedrich, 2019; Fikar, Hirsch og Gronalt, 2018; Hofmann *et al.*, 2017; Melo og Baptista, 2017)

Flere av studiene viser til at den enkelte lokasjon er valgt av flere årsaker. Eksempelvis er Grenoble vurdert til å være en ideell lokasjon for bruk av lastesykler i varedistribusjon på grunn av tidvis dårlig luftkvalitet, trang bykjerne og et høyt antall enveiskjørt gater og fotgjengersoner (Hofmann *et al.*, 2017). I Wien sees det på et område som er omfattet av restriksjoner for motoriserte kjøretøy (Fikar, Hirsch og Gronalt, 2018).

Studiene benytter ulike verktøy og fremgangsmetoder. Open Street Map (OSM) er benyttet i flere tilfeller, og er kartgrunnlag som benyttes i simulering av rutevalg for ulike kjøretøy. OSP benyttes som regel i samhandling med et GIS-verktøy. «Vehicle Routing Problem» (VRP), eller tilnærminger til teorien bak VRP blir i flere studier benyttet i rutevalg for leveransene (Arnold *et al.*, 2018; Elbert og Friedrich, 2019; Hofmann *et al.*, 2017). En modell av Porto sentrum er utviklet i AIMSUN, som er et mikroskopisk simuleringsverktøy. Ulike scenarier er testet for å kunne sammenligne hvilken grad av forflytning fra biler og varebiler over til lastesykler som er gunstigst (Melo og Baptista, 2017). En annen løsning er koding av en valg algoritme som har som mål å velge det optimale kjøretøyet og rutevalget for hver leveranse, dette gir beslutningstakere gode muligheter for å teste ulike løsninger på en enkel og fleksibel måte (Fikar, Hirsch og Gronalt, 2018).

Flere av studiene har satt opp ulike scenarier. I studien for Antwerpen er tre scenarier sammenlignet; (1) bruken av hentepunkt, (2) leveranse med lastesykkle og (3) en kombinasjon av de to første. Disse blir sammenlignet med eksisterende leveransemetode (Arnold *et al.*, 2018). I studien fra Frankfurt er det satt opp fire hovedscenarier. (1) Individuell leveranse med varebiler og lastebiler fra leverandørens depot. (2) Leverandøren overfører leveransene til nærmeste konsolideringssenter som benytter varebiler og lastebiler. (3) Leverandøren overfører leveransene til nærmeste konsolideringssenter som benytter varebiler og lastebiler videre til mikro konsolideringssenter som videre benytter lastesykler. (4) Leverandøren overfører leveransene til nærmeste mikro konsolideringssenter som benytter lastesykler (Elbert og Friedrich, 2019). For å anslå behovet for antall lastesykler i studiet lokalisert i Grenoble er det utført simulering hvor total tidsbruk for alle leveranser er funnet. Disse tidsestimatene er videre benyttet til å anslå behovet for antall lastesykler. Disse resultatene er benyttet i gjennomføringen av to scenarier; (1) et scenario for sammenligning hvor varebiler benyttes og (2) et scenario hvor lastebiler og lastesykler benyttes, hvor lastebiler transporterer varer til fire sentrale omlastningspunkt og lastesykler utfører sisteledds distribusjonen (Hofmann *et al.*, 2017). Et depot eller konsolideringspunkt er vurdert i flere av studiene. Dette er et punkt hvor varer lastes om fra større til mindre kjøretøy, og eventuelt samlaster varer fra ulike bedrifter. For studiet som tar for seg matleveranser i Wien sees det på bruken av et konsolideringspunkt hvor

varebiler og lastesykler leverer ut mat fra konkurrerende resultanter, og hvordan dette kan benyttes for å levere ut til kunden mest mulig effektivt. Typisk vil varebiler benyttes til å levere varen til et konsolideringspunkt, mens lastesykler benyttes for å levere varen videre ut til kunden (Fikar, Hirsch og Gronalt, 2018). Studien fra Porto har noe annet fokus, og modellen er fra et lite område, med høy detaljeringsgrad og fokus rundt trafikkavvikling (Melo og Baptista, 2017).

Resultater fra studiene viser til ulike funn. Hvilke typer varer som forflyttes over til mindre kjøretøy vil påvirke i hvor stor grad en kan ta i bruk lastesykler. For mange lastesykler kan også føre til negativ effekt for trafikken. Hvordan implementeringen av nye tiltak påvirker økonomien varierer mellom de ulike studiene. Ved valg av rett løsning og andel varer som forflyttes over til lastesykkler er det i de fleste tilfeller økonomisk gunstigere enn eksisterende løsninger. Generelt, ved delvis forflytning over til lastesykler i den urbane varedistribusjonen vil det være et positivt tiltak med tanke på kødannelse, lokal forurensning, klimagassutslipp og støy (Arnold *et al.*, 2018; Hofmann *et al.*, 2017; Melo og Baptista, 2017). I studier hvor det er sett på en kombinasjon av konsolideringssenter og bruken av lastesykkler har dette vist seg å være det mest lønnsomme tiltaket (Elbert og Friedrich, 2019).

Usikkerhet og svakheter med studiene omhandler blant annet usikkerhet i dataen som er benyttet. Da det for eksempel er gjort antagelser i tidsbruk per leveranse for lastesykler og hvor stor eller liten grad sykler påvirkes av trafikken i et bysentrum. Alle aspekter kan heller ikke inkluderes i en simulering, som ulike trafikksituasjoner og hvordan returvarer påvirker leveranser med lastesykkler (Elbert og Friedrich, 2019). Andre utfordringer som er sett omhandler overføring av resultater til andre lokasjoner da lokale faktorer som størrelse på byen, infrastruktur, tetthet på etterspørsel etter leveranser og konkurranse mellom ulike firma påvirker eksisterende leveranseløsninger og nye løsninger som lastesykkler (Arnold *et al.*, 2018).

Erfaringer fra å gjennomføre en type forstudie for å kunne samle informasjon og beslutningsgrunnlag for å avgjøre om nye løsninger som lastesykler kan benyttes er god. En viktig fordel med simuleringsstudier er gjennomførbarheten, skalerbarhet og fleksibilitet. Det pekes også på viktighet i en realistisk modell, for å få resultater som kan overføres til virkeligheten, dette baseres på inputdata og oppbyggingen av modellen (Arnold *et al.*, 2018; Hofmann *et al.*, 2017).

2.2. «Vehicle routing problem»

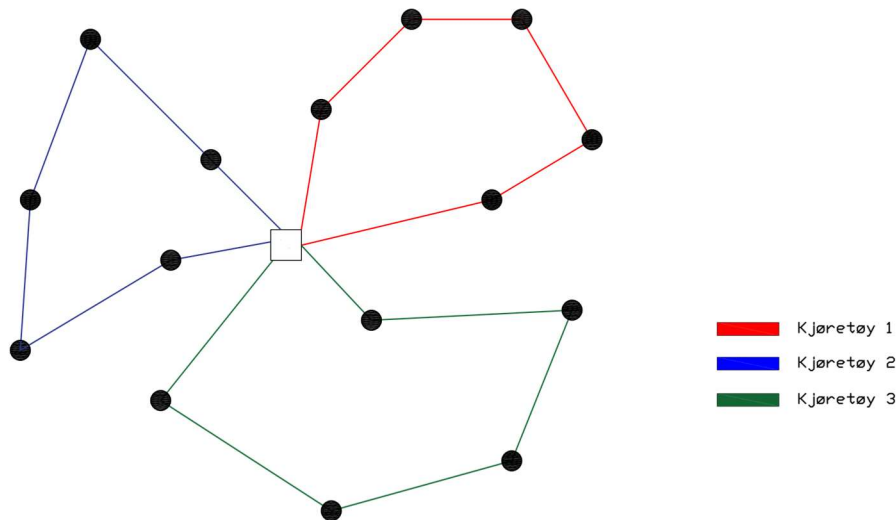
Vehicle routing problem (VRP) er et optimaliseringsproblem, som benyttes for å finne optimale ruter for en kjøretøysflåte under betingelser om at et vare- eller godskvantum skal leveres eller samles inn. I problemet starter og slutter rutene på et depot og skal betjene et gitt antall kunder $N=1, 2, \dots, n$, ved hjelp av et eller flere kjøretøy $K= 1,2,\dots,k$. En enkel illustrasjon av VRP er vist i Figur 3.

VRP er en forlengelse av «Travelling Salesman Problem» (TSP). TSP er basert på spørsmålet om hvilken rute en selger må ta for å få kortest mulig reisevei, når han skal besøke hver by på en liste en gang før han returnerer til sin hjemby.

Det finnes ulike varianter av VRP blant annet capacitated-, heterogen kjøretøysflåte- og «multi depot» VRP, disse er navngitt etter fokus/funksjon i problemet. Den mest studerte blant variantene er Capacitated VRP, denne tar for seg leveranser fra et depot, til et gitt antall kunder med en homogen kjøretøysflåte.

VRP har utviklet seg siden slutten av 50-tallet, og fra 80-tallet er VRP utviklet innen

programvarer som «Geographical Information Systems» (GIS) og avanserte planleggingsystem (Liu, 2009; Gayialis, Konstantakopoulos og Tatsiopoulos, 2019; Lawler *et al.*, 1985; Toth og Vigo, 2002).



Figur 3: Illustrasjon av «Vehicle Routing Problem» (illustrasjon: Ingvild M. Myhre, inspirert av figur 3.4 (Toth og Vigo, 2002, s. 73))

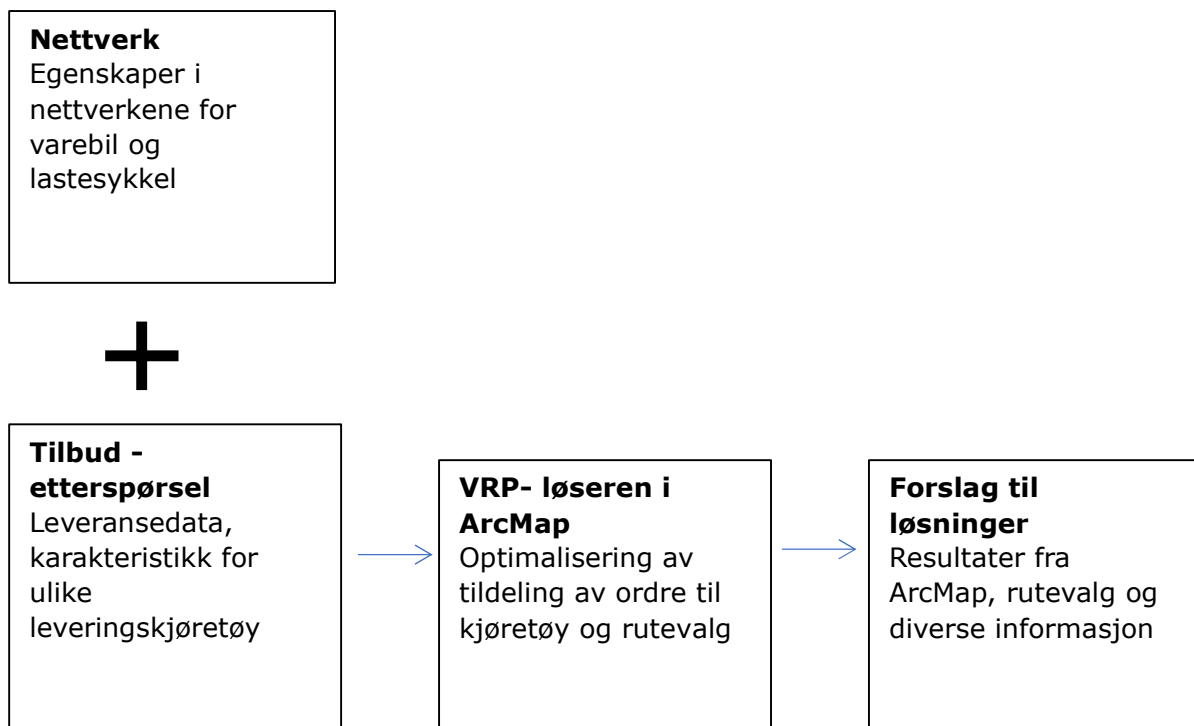
Litteraturgjennomgang av artikler som omhandler VRP ser i hovedsak på omfang av bruken, bruksområdet og metoder som er benyttet i den enkelte problemstillingen. VRP blir for eksempel benyttet for å løse logistikkutfordringer omhandlende pengetransport, vareleveranse, søppelhenting og sosial lovgivning for sjåførers arbeidstid, og ofte i sammenheng med disse problemene i bylogistikk. Studier som benytter VRP og omhandler bylogistikk fokuserer ofte på tidsproblematikk og lokal forurensning. Studiene er gjennomført for problemløsning for ulike parter, som avsendere, transportører, mottakere/innbyggere og administratorer. Antall løsningsmetoder for VRP har hatt en stor økning de siste tiårene. Litteraturgjennomganger av VRP studier viser til at metoden som VRP løsere er bygd opp på i de fleste tilfeller er metaheuristikk, hvor det i størst grad er sett på Capacitated VRP. Metaheuristikk løsningsmetode er benyttet da VRP kan være omfattende, og det ved bruk av denne fremgangsmåten vil finne en løsning som er relativt nære den optimale, samt at det vil være tidsbesparende sammenlignet med å finne den optimale løsningen. En metaheuristikk prosedyre forenkler optimaliseringsproblemet, men finner en tilstrekkelig god løsning. Ved testing av VRP blir det i aller størst grad benyttet kunstig data, ikke sanntidsdata, men bruken av sanntids begrensinger og forutsetninger er i større grad benyttet i nyere tid (Braekers, Ramaekers og Van Nieuwenhuyse, 2016; Kim *et al.*, 2015).

3.Data og metode

I dette kapitlet presenteres valg av metode og data for rutevalgsmodellen. Utviklingen av rutevalgsmodellen, og arbeidet med data benyttet i den er i stor grad en del av formålet til oppgaven.

Studiet startet med et litteratursøk, hvor det i hovedsak har vært fokus rundt lastesykler i varedistribusjon. Mer spesifikt forstudier av lastesykkel hvor modeller eller andre analysemetoder er benyttet for å undersøke bruken av lastesykkel før de er tatt i bruk. Informasjonsinnhenting for inputdata i modellen har også vært en viktig del av litteratursøket. Under arbeidet med data og modell er det benyttet ArcMap og Microsoftprogrammene Excel og Access. Det er også diskutert noen av antagelsene som er gjort i utviklingen av modellen og behandlingen av leveransedata og annen inputdata.

En prinsippskisse for arbeidet med rutevalgsmodellen er presentert nedenfor. Arbeidet med rutevalgsmodellen og data som er benyttet er mer detaljert beskrevet videre i kapitlet. Rutevalgsmodellen er bygget opp av to nettverk, som henholdsvis inneholder egenskaper for bil og sykkel. Leveransedata som dekker et område i Trondheim sentrum benyttes, dataen inneholder informasjon om leveringsadresse, vekt og volum. Leveransene blir utført med ulike kjøretøy, karakteristikker som vekt- og volumbegrensninger og tidsbruk for ulike oppgaver defineres. For å kunne sammenligne ulike kjøretøy og forutsetninger er flere scenarier satt opp. For å simulere scenariene benyttes et integrert VRP-verktøy i ArcMap. Verktøyet optimaliserer tildeling av ordre til kjøretøy og rutevalg for å utføre leveransene. Resultatene fra VRP-verktøyet gir informasjon som rutevalg, tidsbruk og reiselengde. Arbeidet med rutevalgsmodellen og resultatene fra scenariene blir videre benyttet i diskusjon av formålene med oppgaven.



Figur 4: Prinsippskisse for arbeid med rutevalgsmodell

3.1. Oppbygging av rutevalgsmoell

Modellen består av en sykkelmodell og en bilmodell. Rutevalgsmoellen er bygd opp av to modeller da det skal simuleres vareleveranse med varebil og lastesykkel som har ulike muligheter for veivalg og restriksjoner for hastighet. I modellen er det lagt inn leveransedata, som brukes til å simulere leveranser av varer ved bruk av lastesykkel og varebil. Modellen er laget i ArcMap 10.7, og simuleringen utføres ved bruk av «Network Analyst» verktøyet «Vehicle Routing Problem».

ArcMap er et verktøy som benyttes for å behandle romlige data. For slike analyser som er utført kan flere ulike verktøy og fremgangsmåter benyttes. Eksempler på det er nevnt i teorikapittelet. Det er valgt å benytte ArcMap på grunn av mulighetene for nettverksanalyser. Tidligere bruk av programmet, samt at veileder Yngve K. Frøyen har god kunnskap i bruken av ArcMap har også bidratt til valget av ArcMap som verktøy i oppgaven.

I ArcMap finnes VRP som et analyseverktøy under «Network Analyst». VRP I ArcMap blir løst ved at det først kalkuleres en matrise for opprinnelse – mål for hver enkelt leveranse og depot. Dette benyttes videre for å konstruere den opp mot optimale løsningen ved bruk av heuristisk prosess. Resultatene fra analyser med ulike kjøretøy og sammensetninger i ArcMap gir sammenlignbare resultater. Verktøyet tar hensyn til blant annet kjøretøyets kapasitet og eventuelle spesifikasjoner rundt leveransen som tidsvindu og egenskaper for transporten (Esri, 2019a).

Ved å benytte et verktøy med et innebygd VRP verktøy er oppbygningen av hvordan problemet løses ukjent. Dette betyr at en ikke kan følge selve prosessen til verktøyet, som ved for eksempel å programmere en kode som løser VRP.

3.1.1. Studieområder

Lokasjonen for simuleringen er Trondheim. Trondheim er en middels stor by med omkring 200 000 innbyggere. Oversiktskart over den sentrale delen av Trondheim er vist i Figur 5. Studieområder er mer spesifikt Trondheim sentrum. Bruken av lastesykkel er mer aktuell for et slikt urbant område, hvor det gjerne er prioritert fremkommelighet for syklist, fotgjengere og kollektivtransport, som kan gi bruken av lastesykler fordeler sammenlignet med varebil. Trondheim er valgt som studieområdet på grunn av interesse fra kommunen til prosjektet og nærhet med tanke på kontakt med næringsliv og kunnskap om byen.



Figur 5: Oversiktskart Trondheim (Vegkart)

3.1.2. Oppbygging av nettverkene

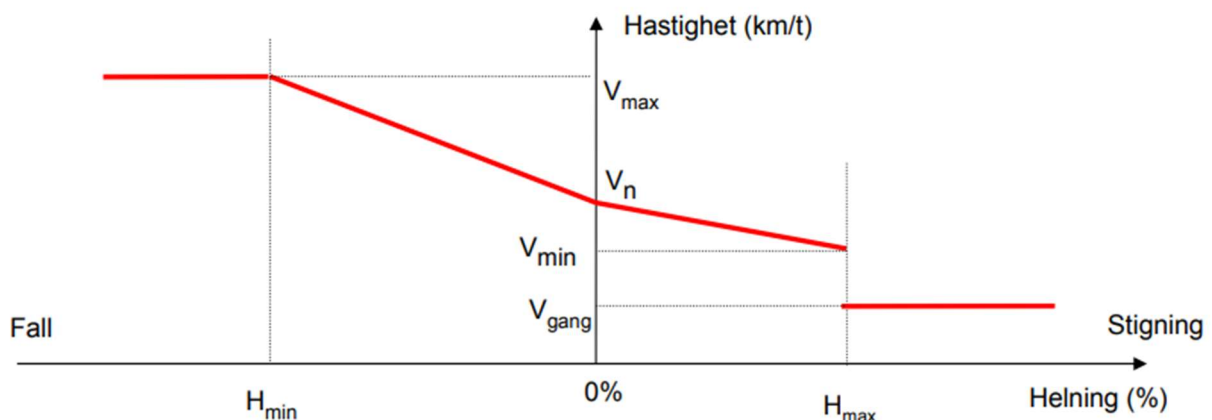
Sykkelmodellen er bygget på et eksisterende sykkelnettverk. Nettverket består av lenker fra Nasjonal vegdatabank (NVDB) og lenker fra «Open Street Map» (OSM). NVDB er en vegdatabank fra Statens vegvesen. Databasen inneholder informasjon om statlige, kommunale, private, fylkes- og skogsbilveier. I dataen ligger informasjon og veinettets geometri og topologi (*Nasjonal vegdatabank (NVDB), 2020*). OSM er et samarbeidsprosjekt hvor frie, redigerbare kart for hele verden er sammenfattet (*About OpenStreetMap*). Lenkene fra NVDB og OSM supplerer hverandre, men i flere tilfeller overlapper de også hverandre. Dette har ikke noen betydning for hensikten til denne modellen, men er noe å være oppmerksom på i eventuelt videre bruk, med andre hensikter. Dette nettverket er bearbeidet for å kunne benyttes i denne studien. Sykkelnettverket dekker hele Norge og er derfor modifisert ved hjelp av klipp i ArcMap. Det er tatt to klipp ut fra modellen, et for Trondheim, og et for Trondheim sentrum. Dette for å begrense datamengde i modellen, men også for å holde muligheten for andre bruksområder i ulike områder i Trondheim intakt. For å gjøre nettverket mest mulig realistisk er fokusområdet Trondheim sentrum undersøkt og redigert, med visuell støtte i ortofoto som er lagt inn i ArcMap. Nye lenker er tilført nettverket hvor det er funnet mangler, dette er utført etter (Frøyen, Y. K., 2019) manual. Eventuelle lenker som sees på som urealistiske veivalg for lastesykkel, som for vanlige sykler kan være mer aktuelle er tilført restriksjoner som fører til at lenkene ikke er et veivalg i simuleringene.

Reisetiden for en lenke i sykkelnettverket er regnet ut med en scriptrutine for sammenheng mellom hastighet og stigningsforhold, som er en del av applikasjonen Areal- og transportplanleggingsmodellen (ATP-modellen) (Ørnes og Norddal, 2011). Denne metoden regner ut hvor lang tid en bruker på å passere hver enkelt lenke, i dette

tilfellet for sykkel. Det regnes ut reisetid for begge retninger, da disse ofte er ulike på grunn av stigning. Parameterne som legges til grunn for utregning av reisetiden er:

- Ganghastighet [km/t]
- Minste sykkelhastighet [km/t]
- Høyeste sykkelhastighet [km/t]
- Normal sykkelhastighet [km/t]
- Minste helning [%]
- Største helning [%]

Hastighetsmodellen som brukes i ATP-metoden er lineær og tar hensyn til stigning, prinsippet er illustrert i Figur 6. Dette betyr at modellen ikke tar hensyn til akselerasjons- og retardasjonseffekten av stigning og fall, men følger den lineære utviklingen som figur 6 illustrerer. Dette er ikke helt realistisk da blant annet toppfarten holdes uansett fall, dette vil gjerne ikke være tilfellet da gjennomsnittshastigheten gjerne går nedover i en bakke med høyt fall. Et annet eksempel er at hastigheten som regel synker i lengre oppoverbakker med konstant stigning, noe modellen ikke tar hensyn til. Ved H_{\min} , minste helning er maks hastighet nådd, ved 0% stigning har man normal sykkelhastighet, og ved H_{\max} , største helning antas det at syklisten går av sykkelen og blir fotgjenger med den gitte ganghastigheten (Flügel *et al.*, 2017, s. 37; Andreassen, 2003).



Figur 6: Sykkelhastighet i forhold til helning (Andreassen, 2003)

I modellen for lastesykler er følgende parameterverdier satt:

- Ganghastighet 3 km/t
- Minste sykkelhastighet 6 km/t
- Høyeste sykkelhastighet 25 km/t
- Normal sykkelhastighet 16 km/t
- Minste helning -10%
- Største helning 8%

Verdiene for parameterne i modellen er basert på info fra ulike målinger og prosjekter for både vanlige elsykler og lastesykler, samt noen antagelser. Der er lagt til grunn at sykler som blir brukt til varelevering er elektriske assisterte sykler, disse er i Norge begrenset til en øvre hastighet på 25 km/t (Kjøretøyforskriften, 1994). Verdiene for sykkelhastighet er basert på ulike studier, hvor stigning er inkludert i et av studiene. Ganghastigheten blir benyttet når stigningen er over H_{\max} , og er antatt til å være relativt lav da det er vanskelig å manøvrere en tung lastesykkel i stor stigning (Flügel *et al.*, 2017; Dybdalen og Ryeng, 2019; Frøyen, Y. K., 2019). Dette nettverket er benyttet til å lage et

tilsvarende nettverk med 30% lavere hastigheter, som brukes til simuleringer hvor større lastesykler benyttes.

Bilmodellen er bygget på et eksisterende Elveg, lastet ned fra Georges datakatalog. Elveg for det aktuelle området Trondheim er lastet ned (GEONORGE). Informasjon av interesse, som lenker (veier) i bilnettet, fartsgrenser og betingelser som tillatte kjøreretninger er satt sammen til et nettverk.

De samme klippene som er brukt for sykkelnettverket er brukt for å begrense omfanget av bilnettverket, og modellen inneholder et klipp for Trondheim og et for Trondheim sentrum. Fartsgrensen i bilnettet er satt som skiltet hastighet – 5 km/t. Dette er et generelt estimat for å ta hensyn til hvordan en kjører i et bysentrum. Der vil gjerne hastigheten påvirkes av ytre faktorer, man bremses ned i svinger og påvirkes av fotgjengere og annen trafikk. Kjøreretningene ligger kodet inne i dataen som er lastet ned, uten at ArcMap kan lese dette. Her ligger også informasjon om kjørefeltene som tall, hvor oddetall og partall definerer om man kjører med eller mot tegnet retning for lenken, og annen informasjon som om det er sykkelfelt eller kollektivfelt. Dette er manuelt hentet ut til en standard parameter i ArcMap, kaldt ONEWAY. Verdiene for ONEWAY er:

- Blankt – tillat begge kjøreretninger
- FT (fra – til) - oddetall, tillat med tegnet retning
- TF (til – fra) - partall, tillat mot tegnet retning
- N – «no way», ingen motorisert ferdsel, evt. kun for kollektivtransport el.

Nettverkene tar hensyn til hastighet som forklart ovenfor, sanntidsdata er ikke inkludert. Dette gjelder faktorer som kø og opphopning av biler i eksempelvis rushtider, trafikklys og perioder med mye gang- og sykkeltrafikk som kan være til hinder for både biler og lastesykler.

Nettverket er kontrollert for manglende sammenheng eller konnektivitet som vil si at lenker ikke er koblet sammen. I ArcMap er «Network Analyst» verktøyet «service area» benyttet. Hvor det er funnet mangler er disse koblet sammen til nettverket. De ferdige nettverkene for lastesykkel og bil er lagt ved i Vedlegg 2: Nettverk Trondheim sentrum. Nettverkene er fra klippet som er tatt ut i ArcMap for Trondheim sentrum for både bilnettverket og sykkelnettverket.

3.2. Leveransedata

Modellen simulerer leveranser i Trondheim sentrum. Leveransedataene som brukes i modellen er gitt av Posten Norge AS i en Excel-fil. Dataen dekker leveranser utført i januar 2020. Leveransedataene er nøye gjennomgått for et godt innblikk i dens karakteristikk og behovet for bearbeiding for å kunne benyttes i simuleringene, dette er videre presentert.

3.2.1. Behandling av leveransedata

For å kunne benytte dataen fra Posten har et omfattende behov for bearbeiding blitt gjennomført. Dataen er oppfattet som til dels manuelt innskrevet, og er semistrukturert med variasjoner på skrivemåte for adresser og i hvilke kolonner relevant informasjon finnes. Fra Geonorges kartkatalog er adressematricken for Trondheim benyttet. Ved bruk av denne er det lagt til koordinater for alle leveranser så de kan plasseres i

modellen som et punkt. Adressematrikkelen inneholder blant annet unik Object id for hver enkelt adresse, adressekode som representerer et gatenavn med en tallkode, adressenavn, bokstav i adressen, nummer i adressen, postnummer og poststed m.m. illustrert nedenfor i Tabell 2. Videre forklart er adressekoden 6020, en kode for gatenavnet «Prinsens gate», og nummer og eventuelt bokstav representerer den eksakte adressen.

OBJECTID	adressekode	adressenavn	bokstav	nummer	postnummer	poststed
2130	6020	Prinsens gate		44	7011	TRONDHEIM

Tabell 2: Adresse fra adressematrikkelen

Leveransedataen må være sammenlignbar med adressematrikkelen for å kunne legges inn i ArcMap, dvs. en leveranseadresse må tilsvare en adresse i matrikkelen som tilsvare et geografisk punkt med x- og y koordinater. For å forsøke å oppnå dette er leveransedataen kodet for hver leveranse. En leveranse med en leveringsadresse er tilført en adressekode for gatenavn og adressenummer og eventuelt bokstav i adressen er hentet ut fra leveringsadressen. Disse er lagt til i tabellen for leveransedataen. Et eksempel på hvordan en leveringsadresse er kodet om slik at den kan legges inn i ArcMap er vist i Tabell 3. Adressekode, adressenummer og eventuelt tilhørende bokstav for adressenummer er hver for seg, og kan dermed kobles opp mot en adresse i adressematrikkelen. Et utdrag fra leveransedataen med felt som er lagt til er vedlagt i Vedlegg 3: Eksempel leveransedata.

Leveringsadresse - - fra Postens data	Adressekode - fra adressematrikkelen	Adressenummer - hentet ut fra leveringsadresse	Adressenummer bokstav - hentet ut fra leveringsadresse
Brattorkaia 15, Blokk B, 5. etasje	1179	15	
Prinsens gate 2b	6020	2	b

Tabell 3: Kodet leveranseadresse

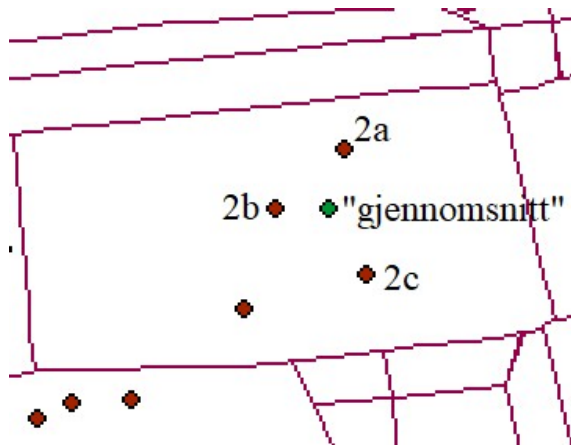
For å standardisere leveransedataen slik at den kan legges inn som geografiske punkt i ArcMap er Access benyttet. Access er et databasehåndteringsprogram utviklet av Microsoft (Microsoft, 2020).

I leveransedataen er alle gatenavn tilegnet sin unike adressekode, hentet fra matrikkelen ved å benytte en «spørring» i Access. Ved å sette krav om innhold i en leveranseadresse som for eksempel «kjøpmann», kan adressekode for «Kjøpmannsgata» legges til for disse leveransene. For å sikre at det ikke blir feil adressekode, ved for eksempel like adressenavn er adressekodene gjennomgått manuelt underveis. Leveranser som «spørringen» ikke koder er håndtert manuelt. Variasjon på hvor relevant informasjon er lagt til, mange ulike oppsett for adresser og ulike skrivemåter som er benyttet for samme adressenavn, eksempelvis uten æ, ø og å, krever nøye gjennomgang av dataen. Adressenummer er hentet ut fra leveringsadresser ved hjelp av koding i Access, det er laget en kode i det som heter «Modul», koden er vist i Vedlegg 1: Kode Access. Koden henter ut tall fra teksten, med visse krav om lengde og plassering for å unngå å ta med eksempelvis telefonnummer som er skrevet inn sammen med en leveringsadresse. Bokstaver i adressenummer er hentet ut ved «spørring» i Access.

Leveransedata som var tilført adressekode, adressenummer og bokstav ble sammenlignet med adressematrikkelen. Ved sammenligning fant Access en match på

omkring 500 av 12 000 leveranser. På grunn av dette er bokstavene i hver enkelt leveringsadresse ekskludert, og hver adresse med sitt geografiske punkt i adressematricken er behandlet slik at bokstaven i en adresse ikke må benyttes.

Et gjennomsnittlig geografisk punkt for alle adresser med a, b, c osv. fra adressematricken er lagt til i ArcMap, illustrert i Figur 7.



Figur 7: Geometrisk tyngdepunkt av adressepunkter

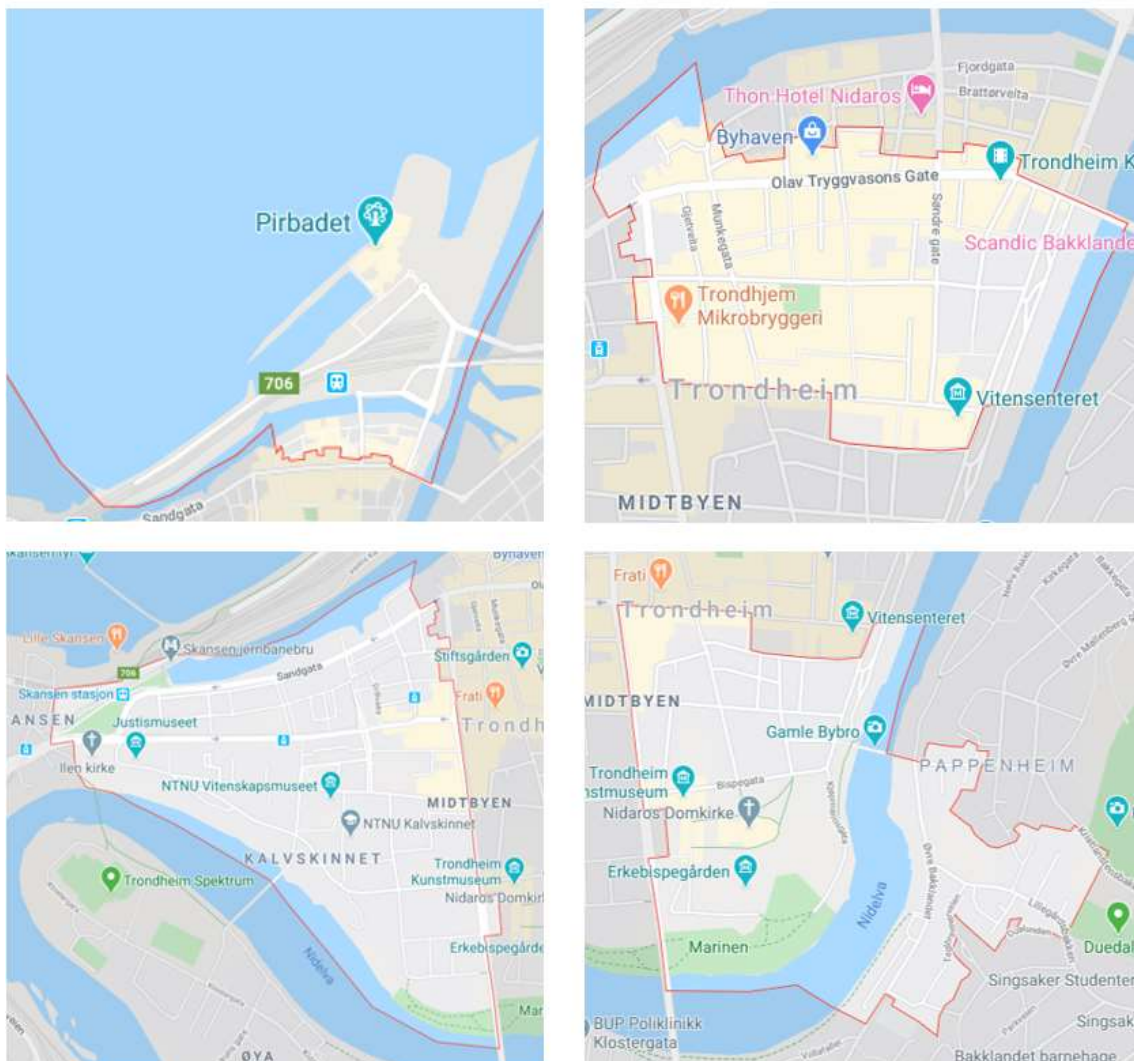
Dette fører til at man kun trenger å sammenligne adressekode og adressenummer. Dette førte til at 11 985 leveranser har match med en adresse fra matricken. Disse leveransene er dataen som brukes videre i oppgaven. Nøyaktig leveringspunkt er heller ikke nødvendig, da det er en simulering og dette påvirker outputdata som er av liten interesse. 603 leveranser ble derimot fjernet, da de ikke oppnådd en match med en adresse fra matricken, dette er under 5 % av dataen.

Et titall leveranser er manuelt fjernet i ArcMap da de var lokalisert utenfor interesseområdet, som er Midtbyen og Brattøra.

3.2.2. Karakteristikk av leveransedata

Leveransedataen ble gitt av Posten i en Excel-fil. Dataen ble undersøkt for å bedre forstå dens karakteristikk og hvordan den kunne benyttes i simuleringene. Dette var nødvendig i utviklingen av modellen. Den viktigste informasjonen om dataen er videre beskrevet.

Leveransedataen som er gjort tilgjengelig for oppgaven strekker seg over en måned med levering og inneholder over 12 000 leveranser. Det aktuelle området er avgrenset av postnumrene 7010, 7011, 7012 og 7013 Trondheim. Området postnumrene dekker er vist i Figur 8. Leveransedataen inneholder relevant data som vekt, volum, avsendersted, mottaksadresse og dato for utlevering.



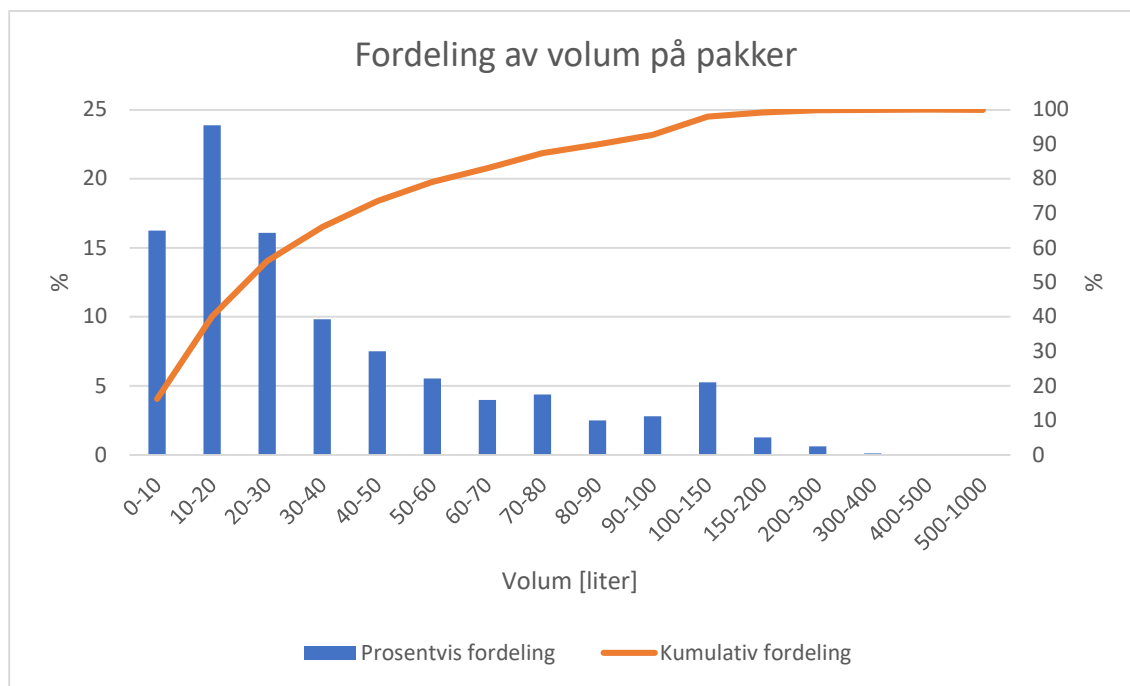
Figur 8: Postnummer for leveransedata, fra øverst til venstre; postnummer 7010, 7011, 7012 og 7013 Trondheim, Skjermbilde Google Maps

Noen fakta om leveransedataen:

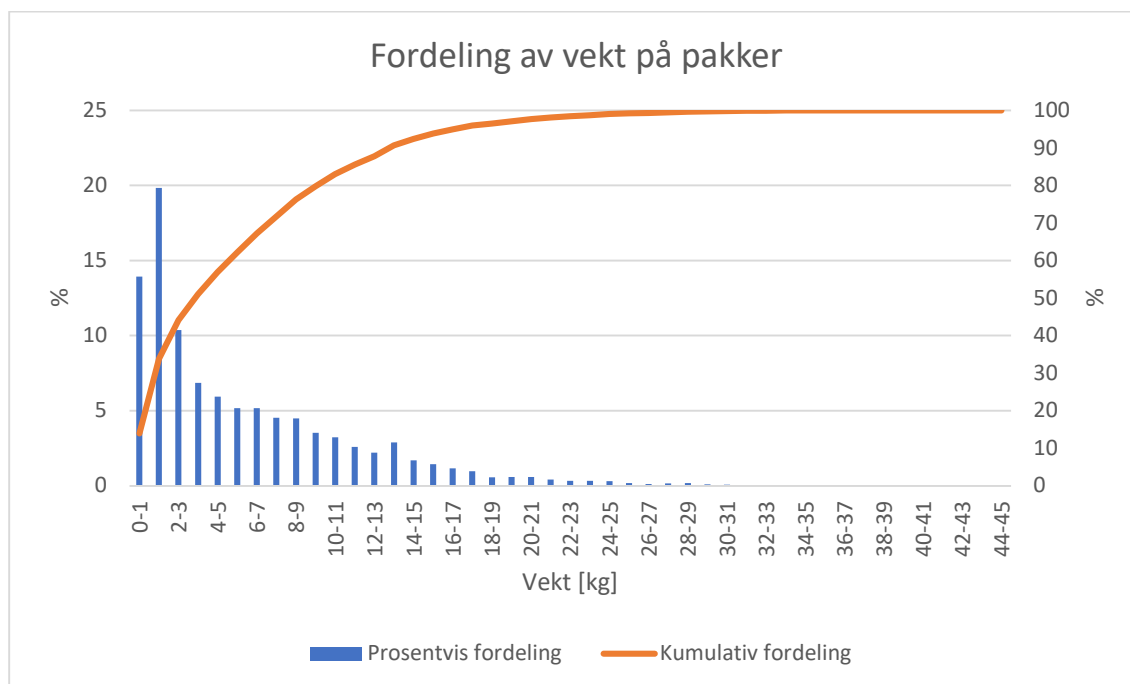
- Leveransene er fra januar 2020
- 11 985 leveranser er lagt inn i modellen i ArcMap
- Leveransene som er benyttet er fordelt på 22 utleveringsdatoer.
- I snitt er det 544,8 leveranser per dag.
- Minste antall leveranser på en dag er 277, største antall er 709
- Alle leveransene, 11 985 er under 1m^3 størrelse ($1\ 000\ 000\ \text{cm}^3$)
- 11 264 leveranser er under $0,1\ \text{m}^3$ (100 liter), 94%
- 11 819 leveranser veier mindre enn 23 kg, 98,6%
- 11 155 leveranser er under $0,1\ \text{m}^3$ og veier mindre enn 23 kg, 93,1%

Antall leveranser i løpet av en dag varierer mellom 277 og 709, dette er ytterpunkter og de fleste dagene ligger antallet leveranser mellom 500 til 600. Dagene med markant færre leveranser kommer rett etter juleferie, og en kan på grunn av det anta at det er unormalt lite leveranser sammenlignet med en «normaldag» ut ifra antall leveranser resten av måneden.

Figur 9 og Figur 10 er visuelle fremstillinger av fordeling av volum og vekt på pakkene. Fra grafene kan man se en generell karakteristikk av leveransene, hvor de aller fleste er relativt små og/eller lette. Dette gir også et generelt grunnlag hvor en kan anta at de fleste leveranser i midtbyen vil være enkle å håndtere av et menneske, uten bruk av hjelpemiddel. Dette kan antas som et krav for leveranser som skal utføres med lastesykkel.

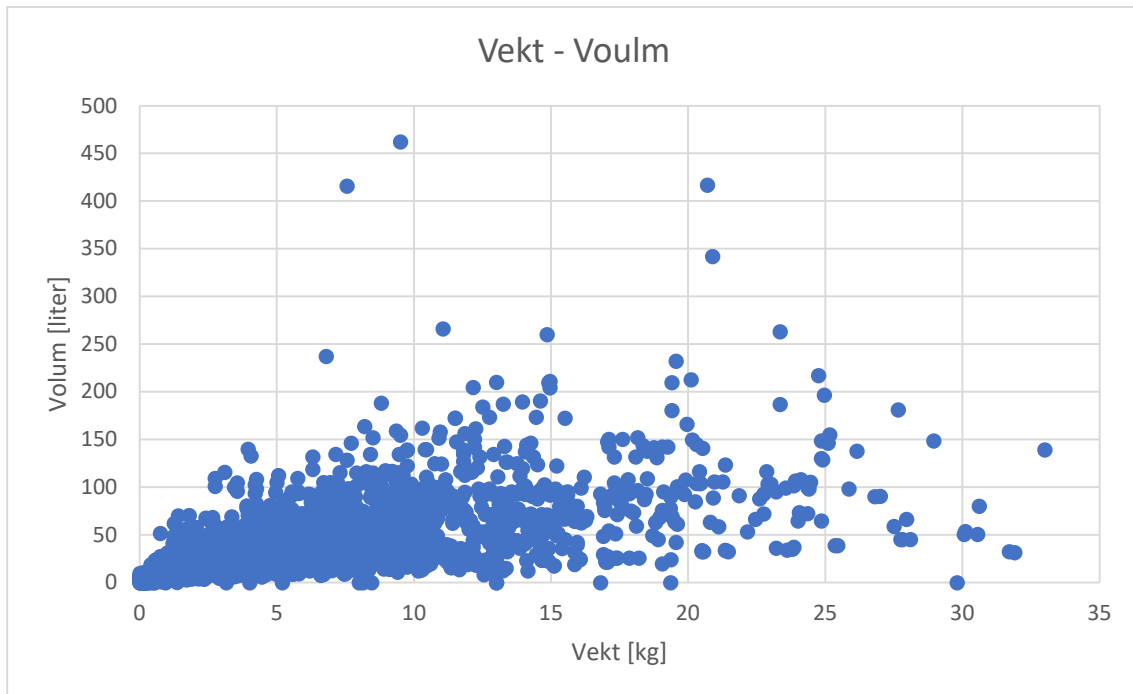


Figur 9: Fordeling av volm på pakker



Figur 10: Fordeling av vekt på pakker

Videre kan man fra Figur 11 se sammenhengen mellom vekt og volum på leveransene. Man ser tydelig også her at de aller fleste pakker har relativt lite volum og vekt, og at lav vekt ofte indikerer et mindre volum og motsatt. Grafen viser også at det i noen tilfeller er pakker med liten vekt som har høyt volum, og i noen flere tilfeller tyngre pakker, +23 kg som har relativt lite volum, under 100 liter.

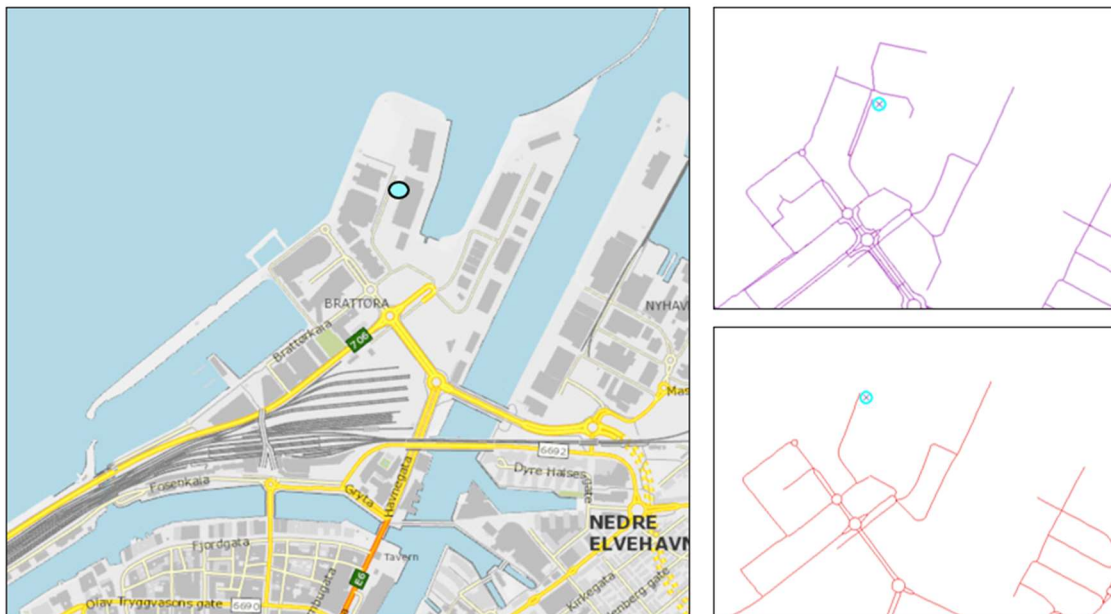


Figur 11: Vekt – volum

3.3. Kjøretøysdata

For å utføre VRP er det lagt inn ulike data i modellen for kjøretøyene som skal sammenlignes. Dette er for eksempel hastighetsbegrensninger og veirestriksjoner forklart i kapittel 3.1.2, samt andre bestemmelser som vektbegrensninger, volumbegrensninger, leveransetid per pakke og lokasjon for depot.

For simuleringen av leveranser vil et start- og slutt punkt være nødvendig. Dette punktet fungerer i teorien som et bylogistikkdepot. Depotet vil være arbeidsplass, oppholdssted ved pauser, omlastningspunkt og gir mulighet for oppfylling av leveranser i løpet av en arbeidsdag. Leveransene simuleres med et depot lokalisert på Brattøra i Trondheim, vist i Figur 12. Depotet har ingen funksjon i modellen, sett bort fra lokasjon og hvordan lokasjonen påvirker reiselengde.



Figur 12: Lokasjon for depot, med utklipp fra sykkelnettverk (øverst t.h.) og bilnettverk (nederst t.h.) (Vegkart)

De ulike parameterne for lastesykkel er vist i Tabell 4. Flere av verdiene er basert på lastesykkelen Armadillo, som er benyttet i ulike land, og er en relativt stor lastesykkel. Verdiene for utnyttelsesgrad er basert på antagelser. For verdiene for maksimalt volum og vekt er begrensningen satt med tanke på funksjonell håndtering i leveranseprosessen og kapasitet på det enkelte kjøretøyet (Velvoe; Dybdalen og Ryeng, 2019; Rundberget et al., 2016).

Parameter / Kjøretøy	Lastesykkel, 1 skap	Lastesykkel, 2 skap
Volum lastekapasitet	1 m ³	2 m ³
Utnyttelsesgrad lastekapasitet	80%	80%
Vektbegrensning	150 kg	300 kg
Leveransetid 1 pakke	2,1 / 2,5 minutt	2,1 / 2,5 minutt
Leveransetid per pakke >1 pakke	1,2 / 1,5 minutt	1,2 / 1,5 minutt
Maksimal vekt per pakke	23 kg	23 kg
Maksimalt volum per pakke	0,1 m ³	0,1 m ³

Tabell 4: Parametere for leveranse med lastesykkel

De ulike parameterne for biler og større kjøretøy er vist i Tabell 5. Lastekapasitet og vektbegrensning for de ulike biltyper som brukes til vareleveranse er i størst grad informasjon fra produsenter samt noen erfaringstall. Tabellen inneholder også et kjøretøy navngitt «snittbil», denne representerer det gjennomsnittlige kjøretøyet som leverer ordre i Trondheim sentrum for Posten AS (Citroën; Renault; StreetScooter).

Parameter / Kjøretøy	Postbil	Varebil/ mindre lastebil	Lastebil	Snittbil «Posten»
Volum lastekapasitet	3 m ³	8 m ³	20 m ³	11 m ³
Utnyttelsesgrad lastekapasitet	70%	70%	70%	70%
Volum utnyttet	2,1 m ³	5,6 m ³	14 m ³	7,7 m ³
Vektbegrensning	500 kg	600 kg	1500 kg	1000 kg
Leveransetid 1 pakke	3,5 / 3 minutt	3,5 / 3 minutt	3,5 / 3 minutt	3,5 / 3 minutt
Leveransetid per pakke >1 pakke	2,5 / 2 minutt	2,5 / 2 minutt	2,5 / 2 minutt	2,5 / 2 minutt

Tabell 5: Parametere for leveranse med motoriserte kjøretøy

Tallene for tid per leveranse sammenfatter tiden det tar fra et kjøretøy parkerer til det forlater parkeringen. For biler og større kjøretøy er det også vurdert at det benyttes tid for hver leveranse på sirkulering for å finne ledig oppstillingsplass. Leveransetiden er delt mellom leveranser med en pakke og leveranser med flere enn en pakke til samme adresse. Dette er gjort med tanke på at det gjerne er en markant forskjell i tidsbruk per pakke når det leveres en eller flere pakker. Dette bidrar til mer presise resultat.

Tallene for «leveransetid per 1 pakke» og «leveransetid per pakke >1 pakke» er innhentet henholdsvis for lastesykkel fra målinger gjort i forbindelse med masteroppgaven «Lastesykler på norsk vinterføre» (Dybdalen og Ryeng, 2019). For biler og større kjøretøy er det benyttet data innhentet i forbindelse med en masteroppgave utført våren 2020 ved NTNU, «Varedistribusjon i bysentrum - Bruk og utforming av leveringsområder» (Romunstad og Moe, 2020), verdier hentet ut fra leveransedataen fra Posten, samt verdier benyttet i andre studier.

Målingene utført ved oppgaven «Varedistribusjon i bysentrum - Bruk og utforming av leveringsområder» (Romunstad og Moe, 2020) inneholder tidsmålinger for stopp i laste- og losselommer. Leveransene er observert i studiet, og relevant data er hentet ut. Dette er blant annet størrelse på kjøretøy, om det utføres leveranser eller ikke, eventuell benyttelse av hjelpemidler under leveranser, antall kolli og tidsmålinger.

Fra observasjonene er det hentet ut målinger som er relevante for denne oppgaven. Dataen som er benyttet består av varelevering håndtert uten hjelpemidler, levert fra biler og varebiler. Leveranser fra lastebil er ekskludert da det fra observasjonsdata ikke er kjennskap til leverandør, mottaker eller størrelse og type på varer, men fra gitt informasjon antas å være større kolli som det er få av i leveransedataen benyttet i denne oppgaven. Det er sett på data fra 3 ulike punkter, Carl Johans gate, Nordre gate og Thomas Angells gate. Fra disse leveransene er gjennomsnittstiden for leveranser 6 minutt ved levering av 1 pakke, og 5 minutt ved levering av flere enn 1 pakke.

Leveransetiden for lastesykkel og bil er også sammenlignet og vurdert opp mot verdier benyttet i andre studier, blant annet (Elbert og Friedrich, 2019) «Urban consolidation and cargo bikes: a simulation study». For varebiler antar de en gjennomsnittstid per leveranse på 3 minutt. Ved flere leveranser innenfor en mindre området estimeres tidsbruken på den første leveransen til gjennomsnittstiden på 3 minutter, deretter 2 minutt per leveranse.

Leveransedataen fra posten inneholder også tidspunkt på utførelse av leveringer og med koder for ulike leveringsenheter. For fem ulike dager er det regnet ut gjennomsnittlig leveransetid per pakke ved levering i samme tidsrom og området, fra samme leveranseenheter. Disse leveransene skjer innenfor et mindre geografisk område, som for

eksempel Brattøra. Tidsbruken for hver leveranse er i gjennomsnitt 2 minutter, hvor det i de aller fleste tilfeller er flere enn en leveranse til samme adresse, eller adresser i umiddelbar nærhet. Disse estimatene er sammenfattet og benyttet videre i oppgaven.

Vilkårene for leveransetiden er satt ut ifra om en leveranse har unik dato og leveringsadresse eller ikke. Er leveransen unik med tanke på dato og adresse settes leveransetiden til tiden for 1 pakke, er den ikke unik, som betyr flere enn en leveranse til samme adresse på samme dato settes leveransetiden tidsbruk for > 1 pakke.

Andre deler av transporten vil også være tidsbelastende, dette er for eksempel start og slutt på arbeidsdagen, påfyll av leveranser og pauser.

Det er antatt at slike prosesser totalt krever tid og gjør utfall på hvor mange leveranser som kan utføres i løpet av en arbeidsdag. Da det er innhentet lite informasjon omhandlende denne delen av leveranseprosessen er ethvert slikt opphold antatt til å vare i 10 minutter. Denne antagelsen er basert på (Elbert og Friedrich, 2019) «Urban consolidation and cargo bikes: a simulation study», hvor det er antatt 5 minutter per lasting, samt en tilleggstid for hver m³ med leveranser.

Dette gjelder for både lastesykkel og bil, selv om det antas en forskjell mellom de ulike kjøretøyene og størrelse på lasten.

3.4. Utførelse av Vehicle Routing Problem i ArcMap

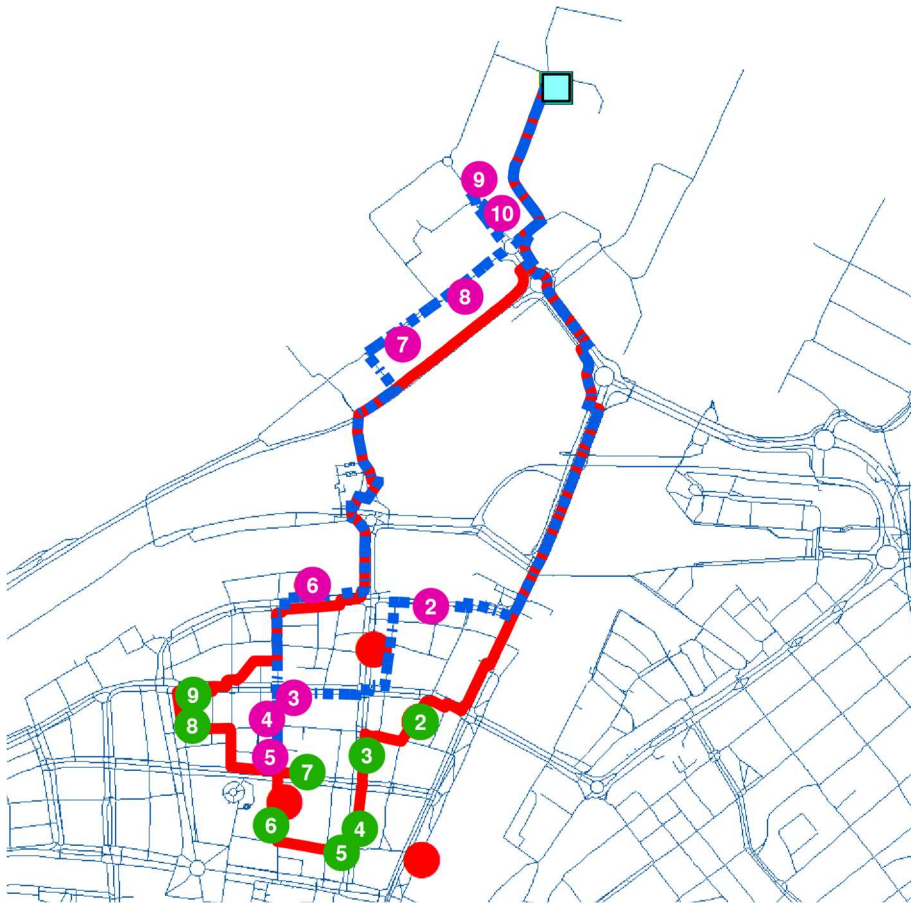
For å sammenligne leveranser med ulike kjøretøy og sammensetninger er «Network Analyst» verktøyet «Vehicle routing problem» benyttet.

Verktøyet krever noe data for at «problemet» skal kunne løses, og videre kan andre spesifikasjoner legges til. Videre forklares det enkelt de viktigste parameterne og inputdataen som blir satt i verktøyet for å løse et scenario.

- Layer properties: generelle innstillinger for «problemet», valg av kilde (bilnettverk eller sykkelnett), kapasitetsbegrensninger og tid- og distanseenhet.
- Orders - ordre: Leveransedata, legger inn leveransedata (på forhånd filtrert, valgt ut dato og eventuelle restriksjoner på volum og vekt). Velger hvilke felt i leveransedata som skal gjelde som servicetid, volum og vekt osv.
- Depot: legges manuelt inn som et punkt for det enkelte «problemet»
- Routes - ruter: en «route» tilsvarer et kjøretøy, hvor man kan legge til et eller flere kjøretøy i «problemet». Legger inn start- og sluttdepot, kapasitet, maksimalt antall ordre tillatt, servicetime ved start og slutt.
- Route Renewals - rutefornyelse: representerer hvert depotbesøk for å laste leveranser på nytt. Rutefornyelser må legges til hvert enkelt kjøretøy for at det kan komme tilbake til depot for å «fylle opp varer». For hver rutefornyelse kan det legges til en forhåndsbestemt servicetid.

Verktøyet har flere funksjoner og hver enkelt av de nevnte parameterne kan tilegnes mer spesifikke restriksjoner som bestemte leveransetidspunkt, kostnader og hvilken side av kjøretøyet varer kan hentes ut fra (Esri, 2019b).

Figur 13 illustrere en forenklet versjon av hvordan VRP fungerer i ArcMap. Eksempelen viser to kjøretøy, rød og blå som utfører leveranser, disse starter og slutter ruten ved samme depot. Leveransene er nummerert etter rekkefølgen verktøyet regner ut som beste rutevalg. De røde leveransene er ikke behandlet.



Figur 13: Illustrasjon av VRP i ArcMap

3.4.1. Behandling av resultater fra VRP

Dataen som er presentert i oppgaven er eksporteringer fra ArcMap «attribute tables» til Excel. I hovedsak er det sett på den samlede dataen for en «route» - et kjøretøy som blant annet inneholder antall leveranser som er utført, total tid, total servicetid, reisetid og reiselengde. Rutefornyelser - «Route renewals» er også hentet ut, med info om last for hver utfart fra depot og antall rutefornyelser. Det er også benyttet noe info fra «orders», som inneholder informasjon om hver enkelt orde i løpet av dagen.

For å hente ut store mengder data fra ArcMap til Excel er det benyttet «Model» i ArcMap. Her er det kodet en funksjon som eksporterer flere tabeller fra ArcMap til Excel. Tabellene er på forhånd lagret i en «Geodatabase» i ArcMap for at «Model» skal kunne overføre alle tabeller samtidig. Videre er dataen bearbeidet i Excel for å kunne presenteres oversiktlig.

3.5. Behovsundersøkelse

Det er utført behovsundersøkelser for å kartlegge en viss oversikt over hvor mange kjøretøy som behøves for å utføre leveranser for en dag, og informasjon om reiselengde og tidsbruk for dette. Ved bruk av VRP verktøy i ArcMap er det som et utgangspunkt simulert en rekke tester for leveranser ved bruk av enten en bil eller en lastesykkel. Leveransene som er brukt i denne simuleringen data fra Posten fra 07.01.20 og filtrert med krav om maksimal størrelse og vekt på under 100 liter og 23 kg for hvert enkelt

kolli. Denne begrensningen inkluderer 11 168 leveranser, 93,2% av leveransene for hele måneden. For 07.01 utgjør denne filtreringen at omkring 7 % av denne dagens leveranser ikke er tatt med i testsimuleringen på grunn av vekt- og størrelsesbegrensningene, og totalt 471 leveranser er benyttet. Dette er restriksjoner som settes på pakker som kan leveres med lastesykkel, og for direkte sammenligning er samme leveranser simulert ved bruk av varebil i behovsundersøkelsene. En kan også anta at tyngre leveranser, +23 kg vil ha lengre servicetid, da det er naturlig å anta at det er vanskeligere å forflytte disse, selv ved bruk av hjelpemidler. Dette markerer et behov for en blandet kjøretøysflåte, hvor varebiler og/eller lastebiler som kan medbringe hjelpemidler for leveranser som jekketralle og tilpassede kjøretøy med lasteplan er nødvendig.

Fra behovsundersøkelsene er det hentet ut data for ulike interesseområder, som total kjørelengde, start- og sluttidspunkt for leveranser og antall rutfornyelser med info om last per rutfornyelse som antall, volum og vekt. Inputdata og resultater for behovsundersøkelsene er presenter i Tabell 6 og Tabell 7. Behovstestene varierer mellom type kjøretøy og deres kapasitet samt ulike tider som benyttes per leveranse.

	Behovstest a	Behovstest b	Behovstest c	Behovstest d
Kjøretøy	Lastesykkel, 1 skap	Lastesykkel, 1 skap	Snittbil	Snittbil
Volum lastekapasitet [m³]	1	1	11	11
Utnyttelsesgrad lastekapasitet [%]	80	80	70	70
Volum utnyttet [m³]	0,8	0,8	7,7	7,7
Vektbegrensning [kg]	150	150	1000	1000
Leveransetid 1 pakke	2,1	2,5	3,5	3
Leveransetid >1 pakke	1,2	1,5	2,5	2
Maksimal vekt per pakke [kg]	23	23	23	23
Maksimalt volum per pakke [m³]	0,1	0,1	1	1
Servicetid depot [min]	10	10	10	10
Leveranser	471	471	471	471

Tabell 6: Inputdata, behovsundersøkelse

	Behovstest a	Behovstest b	Behovstest c	Behovstest d
Kjøretøy	Lastesykkel 1 skap	Lastesykkel 1 skap	Snittbil	Snittbil
Total tid [min/timer]	1070,7 / 17,8	1248,2 / 20,8	1321,5 / 22,0	1089,4 / 18,2
Total servicetid leveranser [min]	615,6	762,5	1233,5	998,0
Total reisetid [min]	275,1	305,7	48,0	51,4
Tid per pakke [min]	2,27	2,65	2,81	2,31
Total reiselengde [km]	71,1	79,4	28,1	30,1
Antall rutefornyelser, inkludert start	17	17	3	3
Arbeidsdag [timer]	6	6	6	6
Behov – kjøretøy	2,97	3,47	3,67	3,03
Leveranser	471	471	471	471
snitt per tur	27,71	27,71	157,00	157,00
Volum [m³]	12,23	12,23	12,23	12,23
snitt per tur [m³]	0,72	0,72	4,08	4,08
Vekt [kg]	2101,98	2101,98	2101,98	2101,98
snitt per tur [kg]	123,66	123,66	700,66	700,66

Tabell 7: Resultat, behovsundersøkelse

Generelt er disse resultatene benyttet til en bedre forståelse for hvordan de ulike nettverkene og parameter som leveransetid og størrelse på kjøretøyet påvirker den totale tiden og reiselengden.

For å kunne estimere et behov for antall kjøretøy per dag videre er det benyttet «Tid per pakke». Fra 3.2.2 Karakteristikk av leveransedata, er det sett at gjennomsnittlig antall leveranser på en dag er 544,8 for dager hvor det blir utført leveranser i januar. Da en arbeidsdag er satt til 6 timer, 360 minutter vil disse verdiene gi et oversalg over behovet for antall kjøretøy det er behov for, for å utføre leveransene i løpet av en arbeidsdag.

3.6. Scenarier

Behovstestene er benyttet til å gjøre et anslag over behov for antall kjøretøy i de ulike scenariene. Disse tester ulike parametere og faktorer som påvirker varedistribusjonen med lastesykkel og varebil. Alle scenariene gjennomføres med samme leveransetid per ordre for hvert av de ulike kjøretøyene. I scenariene er det benyttet lastesykkel med et og to skap og snittbil, videre kalt varebil.

Det er fra behovstestene fastslått at valg av leveransetid har stor innvirkning på den totale tidsbruken. Scenariene gjennomføres ved å benytte en leveransetid for lastesykkel og en for bil. Disse er for lastesykkel 2,5 minutter for en pakke og 1,5 minutter for flere enn en pakke til samme adresse. For bil er verdiene henholdsvis 3 og 2 minutter. Karakteristikk over kjøretøyene som benyttes i scenariene er presenter i Tabell 8.

Kjøretøy	Lastesykkel, 1 skap	Lastesykkel, 2 skap	Varebil
Volum lastekapasitet	1 m ³	2 m ³	11 m ³
Utnyttelsesgrad lastekapasitet	80%	80%	70%
Volum utnyttet	0,8	1,6	7,7
Vektbegrensning	150 kg	300 kg	1000 kg
Leveransetid 1 pakke	2,5 minutt	2,5 minutt	3 minutt
Leveransetid >1 pakke	1,5 minutt	1,5 minutt	2 minutt
Maksimal vekt per pakke	23 kg	23 kg	-
Maksimalt volum per pakke	0,1 m ³	0,1 m ³	-

Tabell 8: Kjøretøy benyttet i scenarier

Scenariene tar for seg leveranser i sentrum av Trondheim, utgangspunktet for leveranser med både lastesykler og bil er et depot på Brattøra. Ved å gi alle kjøretøy samme utgangspunkt kan tid og distanse tilbakelagt under leveransene sammenlignes direkte mellom de ulike scenariene og leveransemetodene.

VRP simuleringene utføres for 5 dager per scenario for å få et relativt godt sammenligningsgrunnlag. Dagene er tilfeldig valgt fra leveransedataen med hensikt om å ha en viss variasjon i antall leveranser for de ulike dagene. Karakteristikk over leveransene for dagene som er benyttet i simuleringene er vist i Tabell 9. Denne dataen er også benyttet til antagelser gjort i scenariene.

Dato	Antall leveranser	<23 kg og <100 liter	<23 kg og <100 liter [%]	≥23 kg og ≥100 liter	≥23 kg og ≥100 liter, sum vekt [kg]	≥23 kg og ≥100 liter, sum volum [liter]	≥23 kg og ≥100 liter, snittvekt [kg]	≥23 kg og ≥100 liter, snittstørrelse [liter]
08. jan	506	476	94,1	30	474,9	3471,4	15,8	115,7
10. jan	651	592	90,9	59	1096,6	7403,1	18,6	125,5
17. jan	586	541	92,3	45	659,1	5613,5	14,6	124,7
22. jan	698	655	93,8	43	649,7	6822,0	15,1	158,7
30. jan	542	507	93,5	35	571,0	5489,4	16,3	156,8
Sum	2983	2771	464,6	212	3451,3	28799,5	80,5	681,4
Gjennomsnitt	596,6	554,2	92,92	42,4	690,3	5759,9	16,1	136,3

Tabell 9: Karakteristikk leveranser, 5 dager

Fra Karakteristikk av leveransedata er det sett at ca. 7% av leveransene per dag er antatt til å ikke være håndterbare av lastesykler på grunn av størrelse og vekt. Det er gjort et overslag over behov for antall varebiler for at disse leveransene skal kunne bli gjennomført, sett ut fra gjennomsnittstall for vekt og volum. Basert på de fem tilfeldig valgte dagene som benyttes i simuleringen er det i snitt 42,4 leveranser som overskrider

det valgte kravet på at leveransene skal være <23 kg og <100 liter for lastesykkel. Leveransene har i gjennomsnitt en vekt på 690,3 kg og 5759,9 liter, 5,8 m³ per dag. Sammenlignet med resultater fra behovstestene og kapasiteten for en varebil er det derfor antatt at disse leveransene kan leveres med en varebil. På grunn av begrensninger i VRP verktøyet i ArcMap blir disse leveransene ekskludert i simuleringen for scenariene med lastesykkel, men teoretisk er scenariene med lastesykkel utført med 4 lastesykler og 1 varebil. Antall kjøretøy er basert ut ifra at leveransene skal kunne bli gjennomført på de dagene med omkring 600 ordre, da de fleste (70%) av dagene har antall ordre mellom 500 - 600. Med restriksjoner på arbeidstid for ulike kjøretøy kan noen leveranser utebli.

Det er satt opp 5 ulike scenarier som simuleres i ArcMap, disse er som følger:

- Scenario 1: 4 varebiler
- Scenario 2: 4 lastesykler med 1 skap og 1 varebil
- Scenario 3: 4 lastesykler med 2 skap og 1 varebil.
- Scenario 4: 4 varebiler i et «vanskeligere bymiljø».
- Scenario 5: 4 varebiler, minsket fremkommelighet

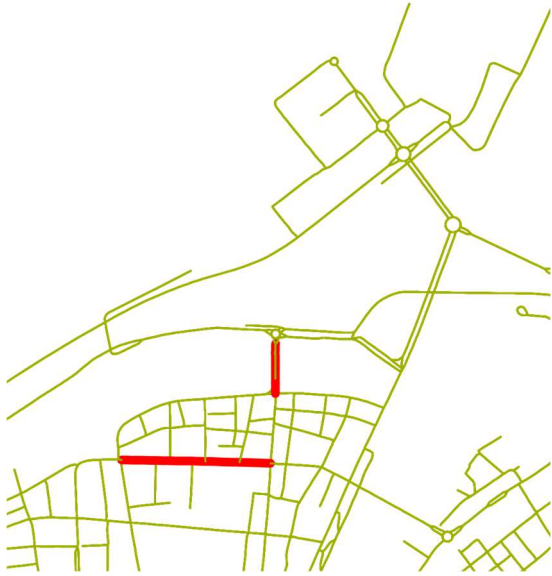
Videre er hvert enkelt scenario beskrevet mer detaljert.

Scenario 1 er utført med bilnettverket for sentrum, med bestemmelsene beskrevet i delkapittelet 3.1.2 Oppbygging av nettverkene.

Scenario 2 og 3 er utført med to ulike sykkelnettverk for sentrum. For scenario 2 er det originale sykkelnettverket benyttet, for scenario 3 et tilsvarende nettverk med 30% lavere hastighet benyttet, da en kan anta at de vil bruke mer tid i trafikken da tyngden og størrelsen vil påvirke hastigheten samt gjøre de vanskeligere å manøvrere.

Scenario 4 tar for seg leveranser slik som scenario 1, men dette scenariet illustrerer et tilfelle hvor det brukes mer tid på reise. Dette er basert på et bysentrum med økt trafikk som fører til lengre reisetid mellom stopp i tillegg til færre losse- og lastelommer og muligheter for stopp, som igjen kan lede til økt sirkulasjonstid for å finne parkering. I VRP-verktøyet er det begrenset hvordan dette kan inkluderes, og er dermed illustrert med mindre maksimal total tid per kjøretøy på 40 minutter. Dette er et overslag på at det for hver 20 leveranse vil benyttes 5 minutter ekstra på reise- og sirkulasjonstid for å finne parkering ved 600 leveranser.

Scenario 5 tar for seg et bysentrum med minsket fremkommelighet. Dette kan eksempelvis være på grunn av ønsket bedring i fremkommelighet for kollektivtransport og myke trafikanter. Derav er det lagt til restriksjonen «no way» for noen lenker i nettverket. I simuleringen er det valgt to områder i Trondheim sentrum, jernbanebrua og Olav Tryggvasons gate fra Søndre gate til Munkegata, områdene som er steng for biltrafikk er illustrert i Figur 14 . Dette medfører at noen leveranser fremstår som utenfor rekkevidde. VRP løseren må tilføres funksjonen «Ignore Invalid Order Locations» slik at simuleringen kan bli gjennomført selv om noen leveranser er utenfor rekkevidde i nettverket som benyttes.



Figur 14: Stengte gater i scenario 5

De fem scenariene skal simuleres for fem dager hver, som vil si at det utføres 25 simuleringer totalt for scenariene i ArcMap. Diverse inputdata for hvert av scenariene er presentert sammen med resultatene i kapittel 4.

4. Resultat

I kapittelet presenteres resultatene fra de fem scenariene. Tabellene viser oversikt over resultater totalt og gjennomsnittlig for hvert av de fem scenariene. Tabellene inneholder også inputdata som karakteriserer de ulike scenariene. Resultatene er videre diskutert i kapittel 5, mer detaljerte resultater for hvert enkelt scenario er lagt ved i vedlegg 5.

Videre følger en beskrivelse av tabellene hvor inputdata og resultater er presentert og beskrevet. For de ulike tabellene representerer verdiene i Tabell 10 sum for alle kjøretøy for alle dager og Tabell 11 gjennomsnitt for alle kjøretøy for alle dager.

Inputverdiene samt karakteristikker for hvert scenario i tabellen er som følger:

- Kjøretøy, hvilken type kjøretøy scenariet benytter.
- Kjøretøy, antallet kjøretøy som benyttes per dag i scenariet.
- Dato, i tabellene for hvert enkelt scenario er dato for leveransene oppgitt.
- Servicetid (ST) start og slutt depot og rutefornyelser, som er satt til 10 minutter for hvert enkelt av disse handlingene.
- Kapasitet, i liter og kg for hvert enkelt kjøretøy i scenariet.
- Maks total tid, presentert som sum og gjennomsnitt for fem dager i Tabell 10 og Tabell 11.
- Ordre, inkluderer både ordre behandlet teoretisk og ordre i ArcMap, og er det reelle antall ordre som er overført til ArcMap av leveransene Posten har utført.
- Ordre behandlet teoretisk, ordre som er utenfor restriksjonene som er satt for lastesykkel, hvor det er en begrensning på størrelse og vekt per kolli på 100 liter og 23 kg. Disse er fjernet fra simuleringene med lastesykkel, og er tiltenkt å leveres med en varebil som ikke er inkludert i simuleringene.
- Ordre i ArcMap, antall ordre som er lagt inn i VRP verktøyet i ArcMap i simuleringene.

Resultatene som er presentert er som følger:

- Ordre behandlet i ArcMap, antallet leveranser som er utført i simuleringen
- Ordre ubehandlet i ArcMap, av ordre i ArcMap, antallet leveranser som ikke er utført i simuleringen.
- Turer (start + rutefornyelser), turer representerer hvor mange ganger et lastet kjøretøy forlater depot, og inkluderer start depot for hvert kjøretøy og alle rutefornyelser. Av turer representerer start en start per kjøretøy.
- Av turer: rutefornyelser, antall rutefornyelser av turer.
- Stopp depot, antall stopp ved depot, en stopp per kjøretøy
- ST ordre, servicetiden i minutt som er benyttet totalt for å utføre leveransene, verdiene for hver enkelt stopp er beskrevet i delkapittel 3.6 Scenarier.
- Reisetid, tid i minutt hvor kjøretøyet er i bevegelse. Kan anses som tiden hvor det er effektiv forflytning mellom ulike lokasjoner.

- ST start og slutt depot og rutefornyelser, servicetid i minutt som er brukt ved nevnte handlinger.
- Total tid, i minutter. Summen av ST ordre, reisetid og ST rutefornyelser, start og slutt depot.
- Reiselengde/ reiselengde totalt, i kilometer.
- Volum/ totalt volum, i liter av ordre som er behandlet
- Vekt/ totalt vekt, i kg av ordre som er behandlet

I Tabell 10 er også følgende resultater presentert:

- % av total tid for ST ordre
- % av total tid for reisetid
- % av total tid ST start og slutt depot og rutefornyelser

I Tabell 11 er også følgende resultater presentert:

- Tid per ordre, i minutt. Den gjennomsnittlige tiden benyttet per ordre av total tid (total tid/ ordre behandlet i ArcMap)
- Gjennomsnittshastighet, i km/t beregnet fra gjennomsnittlig reisetid og reiselengde.

* Ordre ubehandlet i ArcMap for scenario 5: antallet leveranser som ikke er utført i simuleringen. Ordre er ubehandlet av to årsaker, 1: maksimal total tid er benyttet og de resterende leveransene overskrider denne tidsbruken. 2: Ordre utenfor rekkevidde («not travarsebel»), dette har kun påvirket ordre i scenario 5. Resultatene for ordre ubehandlet for scenario 5 er derfor presentert med tre verdier for ubehandlede ordre, xx (xx)(xx), disse representerer «ordre ubehandlet totalt» («not travarsebel») («ikke tid til»), ordre ubehandlet er den totale summen, som fordeles inn i de to andre kategoriene. Dette resultatet må tolkes individuelt for hver dag, er alle ordre ubehandlet «not travarsebel» kan dette bety at disse ordrene teoretisk kan bli levert i løpet av avsatt tid, men VRP verktøyet er begrenset til å ikke kunne gjøre dette. Er flere ordre i kategorien «ikke tid til» vil det gjerne bety at ordre som er satt som «not travarsebel» også kan bli utelatt på grunn av tidsbegrensning.

4.1. Sum

Scenario		s1	s2	s3	s4	s5
Kjøretøy	type	varebil	lastesykkel 1 skap	lastesykkel 2 skap	varebil	varebil
Kjøretøy	antall	4	4 (+ 1)	4 (+ 1)	4	4
ST start og slutt depot og rutefornyelser	min	10	10	10	10	10
Kapasitet	liter, kg	7,7 1000	0,8 150	1,6 300	7,7 1000	7,7 1000
Maks total tid	min	7200	7200	7200	6400+80 0	7200
Ordre	antall	2983	2983	2983	2983	2983
Ordre behandlet teoretisk	antall	0	212	212	0	0
Ordre i ArcMap	antall	2983	2771	2771	2983	2983
Ordre behandlet i ArcMap	antall	2900	2621	2713	2753	2816
Ordre ubehandlet i ArcMap	antall	83	150	58	230	167 (120)(47)
Turer: start+ rutefornyelse	antall	22	101	59	21	23
Av turer: rutefornyelser	antall	2	81	39	1	3
Stopp depot	antall	20	20	20	20	20
Ordre i snitt per tur	antall	131,82	25,95	45,98	131,10	122,43
ST ordre	min	6033	4133,5	4322,5	5658	5868
Reisetid	min	261,29	1583,59	1443,23	235,34	267,25
ST start og slutt depot og rutefornyelser	min	420	1210	790	410	430
Total tid	min	6714,29	6927,09	6555,73	6303,34 +800	6565,25
% av total tid for ST ordre	%	90	60	66	90	89
% av total tid for reisetid	%	4	23	22	4	4
% av total tid ST start og slutt depot og rutefornyelser	%	6	17	12	6	7
Reiselongde	km	158,44	409,30	262,82	143,43	160,55
Volum	liter	105,48	73,97	78,33	101,10	101,92
Vekt	kg	16599,18	12674,40	13381,10	15872,90	16138,02

Tabell 10: Resultat scenarier, sum

4.2. Gjennomsnitt

Scenario		s1	s2	s3	s4	s5
Kjøretøy	type	varebil	lastesykkel 1 skap	lastesykkel 2 skap	varebil	varebil
Kjøretøy	antall	4	4 (+ 1)	4 (+ 1)	4	4
ST start og slutt depot og rutefornyelser	min	10	10	10	10	10
Kapasitet	liter, kg	7,7 1000	0,8 150	1,6 300	7,7 1000	7,7 1000
Maks total tid	min	1440	1440	1440	1280+16 0	1440
Ordre	antall	596,6	596,6	596,6	596,6	596,6
Ordre behandlet teoretisk	antall	0	42,4	42,4	0	0
Ordre i ArcMap	antall	596,6	554,2	554,2	596,6	596,6
Ordre behandlet i ArcMap	antall	580	524,2	542,6	550,6	563,2
Ordre ubehandlet i ArcMap	antall	16,6	30	11,6	46	33,4 (24)(9,4)
Turer: start+ rutefornyelse	antall	4,4	20,2	11,8	4,2	4,6
Av turer: rutefornyelser	antall	0,4	16,2	7,8	0,2	0,6
Stopp depot	antall	4	4	4	4	4
Ordre i snitt per tur	antall	131,82	25,95	45,98	131,10	122,43
ST ordre	min	1206,60	826,70	864,50	1131,60	1173,60
Reisetid	min	52,26	316,72	288,65	47,07	53,45
ST start og slutt depot og rutefornyelser	min	84	242	158	82	86
Total tid	min	1342,86	1385,42	1311,15	1260,67 +160	1313,05
Tid per ordre	min	2,32	2,64	2,41	2,58	2,33
Reiselengde	km	31,69	81,86	52,56	28,69	32,11
Gjennomsnittshastighet	km/t	36,4	15,5	10,9	36,1	36,0
Volum	liter	21,10	14,79	15,67	20,22	20,38
Vekt	kg	3319,84	2534,88	2676,22	3174,58	3227,60

Tabell 11: Resultat scenarier, gjennomsnitt

I tabell 10 presenteres summerte verdier fra hvert enkelt scenario for de fem dagene det er utført simuleringer for, i tabell 11 presenteres gjennomsnittsverdier. Scenario 1, 4 og 5 benytter seg av samme antall og type varebil, hvor scenario 4 og 5 er påført restriksjoner i form av mindre tid og dårligere fremkommelighet. Scenario 1 har 2900 ordre behandlet totalt og 83 ubehandlede ordre. For scenario 4 og 5 er det henholdsvis 2621 -150 og 2816 - 167. Gjennomsnittlig gjennomfører de fire kjøretøyene 4,4, 4,2 og 4,6 turer per dag for de tre nevnte scenariene.

Den prosentvise fordelingen av tidsbruk for disse scenariene er tilnærmet lik, hvor omtrent 90% av tiden brukes på servicetid for ordre, 4% på reisetid og 6% på servicetid ved rutefornyelser, start og slutt depot. Tiden som benyttes per ordre er 2,32 minutter for scenario 1, 2,58 minutter for scenario 4 og 2,33 minutter for scenario 5.

I scenario 2 og 3 utføres leveranser med lastesykkel. Her benyttes også fire kjøretøy i simuleringene, men med ulik kapasitet for de to scenariene. Scenario 2 har 2621 ordre behandlet totalt og 150 ubehandlede ordre, for scenario 3 er verdiene 2713 og 58. For disse scenariene er 42,2 ordre i snitt per dag fjernet fra simuleringene i ArcMap. I scenario 2 gjennomfører de fire lastesyklene i snitt 20,2 turer per dag, i scenario 3 gjennomføres det i snitt 11,6 turer per dag.

For scenario 2 er den prosentvise tidsbruken 59,7% på servicetid for ordre, 22,9% på reisetid og 6% på servicetid ved rutefornyelser, start og slutt depot, for scenario 3 er fordelingen 65,9% - 22,0% - 17,4%. Tiden som benyttes per ordre er 2,64 minutter for scenario 2 og 2,41 for scenario 3.

5. Diskusjon

Videre er hovedmålene for oppgaven diskutert. Disse er som tidligere presenter:

- Utvikle en rutevalgsmo­dell som benytter realistiske verdier for å sammenligne bruken av lastesykkel og bil/varebil i varedistribusjon.
- For å illustrere hvordan modellen kan benyttes skal ulike scenarier simuleres hvor lastesykkel og varebil benyttes. Resultatene skal brukes for å sammenligne ulike leveransemetoder med ulike forutsetninger.

Relevant for diskusjon av disse er delvis kapitlene teori, metode og data samt resultatene fra scenariene.

5.1. Utvikling av rutevalgsmo­dellen

Under arbeidet med rutevalgsmo­dellen er det opparbeidet kunnskap og erfaringer omhandlede data som er benyttet og bruken av ArcMap, dette er videre diskutert. Flere av erfaringene om bearbeiding av data som er benyttet og hvordan rutevalgsmo­dellen er bygd opp kan overføres til videre arbeid med rutevalgsmo­dellen og lignende studier, men også i studier med andre intensjoner.

5.1.1. Inputdata – påvirkning av resultat

Dataen som er lagt til grunne for simuleringen er innheten fra flere ulike målinger og studier, samt data fra transportører og produsenter av lastesykler og varebiler. Inputdataen er viktig for å få realistiske resultater og sammenligning mellom ulike kjøretøy gir utfordringer da verdier for ulike kjøretøy er fra ulike målinger og studier, og dermed har ulikt fokus og ofte forskjellige beregningsmetoder. Denne usikkerheten har gitt grunnlag til å lage flere scenarier for å teste både påvirkningen av parameter og for et bredere sammenligningsperspektiv. I oppgaven sees det på ulike kjøretøy i et mest mulig nøytralt perspektiv, hvor det etterstrebes å unngå favorisering. Konkret forsøker forskningen å ikke anta at lastesykler er den «bedre» leveransemetoden.

Kjøretøyene i scenariene er definert med flere parametere. De fungerer som begrensninger med tanke på tidsbruk og lastekapasitet. Disse begrensningene omfatter satte verdier som kapasitet på kjøretøy og verdier som begrensninger på hver enkelt leveranse og tid brukt for de ulike delene av leveringsprosessen. Kapasitet for et kjøretøy er hentet fra leverandører. Dette er faste verdier som er begrenset av det faktiske volumet og vektbegrensningen til det enkelte kjøretøyet. Utnyttelsesgraden av lastevolumet er den endelige begrensninger på hvor mange ordre som kan medbringes. For varebil er det benyttet erfaringstall fra Posten AS, hvor dette tallet videre er benyttet for å estimere utnyttelsesgrad for andre kjøretøy. En kan anta at forskjellige transportfirma og kjøretøy har ulik utnyttelsesgrad, og denne kan igjen påvirkes av hvilke typer leveranser som transporteres. Valg av maksimalt volum og vekt for pakker for lastesykkel påvirker i stor grad behovet for varebiler i tillegg til lastesykler. Maksimal vekt er satt til 23 kg, dette er basert på at en person skal kunne håndtere pakken uten hjelpemidler. I scenariene er maksimalt volum per pakke satt til 100 liter. Ved å benytte disse begrensningene kan omkring 7% av leveransene ikke bli levert med lastesykkel. Denne begrensningen kan være lavere, og ved eksempelvis en begrensning på maksimal vekt på 23 kg og maksimalt volum per pakke på 50 eller 30 liter vil henholdsvis 26,5% og 44% av leveransene være for store for levering med lastesykkel. Optimale verdier for slike begrensninger kan bli satt ved bruk av erfaringsverdier og utregning på hva som

kan være optimal sammensetning av kjøretøy. Men ved å senke verdien for maksimalt volum må flere leveranser leveres med varebil, som gir et økt behov for antall biler.

Servicetid er det som påvirker den totale tidsbruken mest. Innenfor servicetid finner en servicetid per leveranse, servicetid for depot ved start og slutt og servicetid per rutefornyelse. Servicetid per leveranse har relativt stor innvirkning på den totale tiden. Dette sees tydelig fra behovsundersøkelsene, presentert i delkapittel 3.5 hvor ulike leveransetider er benyttet. Tidene som er benyttet i scenariene for tid brukt per leveranse har 30 sekunder differanse mellom lastesykkel og varebil. Dette betyr at det er fastslått en betydelig forskjell mellom de to kjøretøyene. Samtidig er dataen som er brukt for dette begrenset. For lastesykkel er det benyttet målinger fra en studie, «Lastesykler på norsk vinterføre» (Dybdalen og Ryeng, 2019). Disse målingene viser godt hvordan denne verdien er benyttet i simuleringene, da de er målt for tiden fra kjøretøyet stanser til det begynner å bevege seg igjen, med oversikt over antall pakker som er levert. For leveranser med bil, varebil osv. er det ikke benyttet tilsvarende måling, men sammenfattet data fra Posten AS, masteroppgaven «Varedistribusjon i bysentrum - Bruk og utforming av leveringsområder» (Romunstad og Moe, 2020) og målinger fra andre studier. Dette gir en viss usikkerhet i resultatene, da disse verdiene ikke representerer den eksakt samme handlingen. Servicetid for rutefornyelser og start og slutt av arbeidsdagen ved depot er kun representert med det som kan kalles en «symbolsk» verdi, men hvor det ikke er innhentet datagrunnlag til å anslå den faktiske tidsbruken, og eventuelle forskjeller mellom ulike kjøretøy og størrelsen på lasten.

Noen av verdiene som er benyttet i rutevalgmodellen er antagelser basert på lite eller ingen innhentet data, for eksempel tidsbruk ved depot for å laste varer. Rutevalgmodellen tar heller ikke hensyn til årstider med klimatiske forhold som i Trondheim, som kan påvirke for fremkommeligheten. Dette er forhold som kan påvirke både bil og sykkel.

5.1.2. Bruk av ArcMap som simuleringsverktøy

I løpet av arbeidet med oppgaven er det opparbeidet relativt god kjennskap til ArcMap og spesielt oppbygging av nettverk og bruken av «Network Analyst» verktøyet «Vehicle routing problem». Videre er erfaringer gjort om bruken av ArcMap som verktøy i denne studien vurdert.

Brukervennligheten til programmet er i stor grad god, og flere funksjoner gir muligheten til å redigere datasett underveis. Funksjoner i ArcMap som «Query builder» og «field calculator» er benyttet for å endre og begrense leveransedataen etter at den er satt inn i modellen. «Field calculator» benyttes for å endre og legge til data i et datasett, som eksempelvis nye leveransetider. «Query builder» er benyttet til å begrense leveransedataen for ulike scenarier med restriksjoner om dato, vekt og volum. Automatiske funksjoner i ArcMap er også hjelpelige. I oppbyggingen av nettverk vil ArcMap forsøke å tolke inputdata selv, ved å navngi kolonner «rett» vil ATP-verktøyet tolke disse, eksempler på dette er felt som «no way», «tf» (til - fra), «ft» (fra - til), som beskriver et kjøretøys tilgang på en gate og koordinater. Dette gir eksempelvis restriksjoner om fremkommelighet.

For arbeidet utført i denne studien er utfordringer med ArcMap i hovedsak omhandlende VRP-verktøyet. VRP-verktøyet i ArcMap er begrenset til å omfatte «Capacitated VRP», som omfatter leveranser fra et depot med en homogen kjøretøysflåte. Dette begrenser muligheten til å kunne gjennomføre simuleringer hvor både bil og lastesykkel er inkludert. Dette fører til at en ikke kan sette ulike restriksjoner på kjøretøy i samme

problem når det kommer til begrensninger på volum og vekt på hver enkelt pakke. Hvert «problem» benytter seg også av et nettverk, som betyr at man ikke kan gi ulike restriksjoner for hastighet og valgmuligheter til de ulike kjøretøyene i et scenario. Begge disse begrensningene gjør det vanskelig å utføre scenarier med både varebil og lastesykkel. Det er ikke videre undersøkt hvordan dette problemet kan løses, men eksempelvis kan andre programvarer eller programmering av VRP tilpasset problemstillingen være aktuelt.

Resultatene som kan hentes ut fra de gjennomførte «Vehicle Routing Problems» er begrenset til det ArcMap presenterer. I denne oppgaven er Excel benyttet for å behandle noe av dataen for å få ønskede fremstillinger. Resultatene dekker det som er ansett som relevant informasjon som kan benyttes direkte, som tidsbruk, reiselengde og depotbesøk. Disse verdiene kan også benyttes videre for å bestemme eksempelvis utslipp og behov for vedlikehold av kjøretøy. En visuell animering av rutevalg er også begrenset. Resultatet viser bare en overordnet rute for hvert kjøretøy, uten noen visuelle effekter for å se eksempelvis hver tur. Dette gir en begrensning i form av at en ikke kan kontinuerlig følge ruten til hvert enkelt kjøretøy.

5.1.3. Behandling av ikke-systematisert data

Arbeidet med modellen strekker seg også utover hva som håndteres i ArcMap. Leveransene som er benyttet i oppgaven er data fra utførte leveranser av Posten AS i januar 2020. Da dataen ikke var standardisert, men for eksempel gatenavn manuelt innskrevet var det et stort behov for å kode om dataen. For å kunne legge til en leveranse i ArcMap på dens gitte lokasjon, må den plasseres på et geografisk punkt med koordinater, beskrevet i delkapittel 3.2.1., men mange av leveringsadressene tilsvarte ikke en adresse i adresseregisteret som ble benyttet for koordinater. Denne bearbeidingen er et eksempel på et arbeid som kan bli eliminert om dataen var standardisert i utgangspunktet. Tidsaspektet på en slik type bearbeiding er relativt, men kan sees på som et unødig ekstraarbeid med tanke på at standardisering i prosessen der leveransene skal legges inn kan fjerne problemet. Om bearbeidingen foregår i en tidlig fase, med en standardisert korrigeringsprosess kan de fleste feil lukes ut. Eksempelvis er skrivefeil og bruk/ ikke bruk av æ-ø-å et gjentakende problem, samt forkortelser av gatenavn og ordet gate, til eksempelvis gt. Om de ulike gatenavnene som blir benyttet er begrenset til et gatenavn som finnes i adresseregister som GeoData's, Google Maps, Gule Sider e.l. kan dette automatisk skje når adresser skrives inn.

Problemer med ikke-systematisert data, og data fra ulike kilder som er bygd opp på ulike måter er et gjentakende problem i forskning på gods og varelevering. Mange bransjer kan samarbeid innad og på tvers for å utvikle standarder som kan bidra til å standardisere eksempelvis datasett. Et eksempel på en standard er Transmodel, «Public Transport Reference Data Model» som er en CEN-standard for standardisering av data for offentlig transport i Europa. Denne tar for seg dataform og beskrivelse av ulike tjenester innen data for offentlig transport (Transmodel). Å benytte standardiserte løsninger kan være fordelaktig for den aktuelle bruken, men også i bruk av data slik som i denne oppgaven. Å sette krav om hvordan data kan standardiseres bidrar til å gjøre den anvendelig i forskning og studier.

5.2. Implementering av lastesykler i urban varedistribusjon

Delkapittelet tar for seg implementering av lastesykkel i varedistribusjon. Vurderingene er i hovedsak basert på resultatene fra simuleringen utført i denne studien, presenter i kapittel 4. Resultat inkluderer også vurderinger gjort i andre studier. Scenariene er satt opp for å direkte kunne sammenligne bruken av ulike kjøretøy og forskjellige forutsetninger. De har samme depotlokasjon og samme leveransedata er benyttet i de ulike scenariene.

For alle scenarier med varebiler, 1, 4 og 5 er det benyttet samme antall og type kjøretøy, men forutsetningene for levering er variert med nåværende fremkommelighet (scenario 1, redusert leveringstid pga. et vanskeligere bymiljø (scenario 4) og dårligere fremkommelighet ved færre veivalg (scenario 5). Scenariene med lastesykkel, 2 og 3 benytter seg også av like mange kjøretøy, hvorav scenario 3 har dobbel lastekapasitet, men med tregere hastighet. Disse scenariene er også utført med et teoretisk kjøretøy som håndterer ordre som er ansett som uhåndterbare for lastesykler. Dette betyr at scenariene for lastesykkel benytter seg av et kjøretøy mer enn de med varebil. Resultatene som er hentet ut fra ArcMap inneholder informasjon om ordre som er behandlet og ikke behandlet, reiselengde og den totale tiden, samt fordelingene av tiden mellom servicetid for ordre, servicetid ved depot og reisetid. Informasjon om hver tur er også hentet ut, med informasjon om antall ordre, total vekt og volum. Resultatene fra scenariene presentert i tabell 10 og 11 er videre sammenlignet. Resultatene er benyttet for å kunne sammenligne bruken av lastesykkel opp mot varebil, men også hvordan de ulike forutsetningene benyttet i scenariene påvirker levering med lastesykkel og varebil.

Resultatene som er hentet fra rutevalgmodellen dekker et begrenset område av hvordan lastesykler kan benyttes i urban varedistribusjon samt varebiler, men kan bidra til å kunne diskutere flere aspekter ved bruken. Tilgjengelig data og tidsperspektivet på oppgaven har gitt muligheter samt avgrensninger. Dette medfører at flere aspekter av leveringsprosessen er helt eller delvis sett bort ifra. Simuleringene er begrenset til å kun se på leveranser innad i bysentrum, og ser hverken på tids- eller kostnadsperspektivet på handlinger som skjer før og etter denne delen av leveranseprosessen. Dette inkluderer blant annet frakt av varer til og fra depot, omlastning av varer fra større til mindre kjøretøy og vedlikehold av kjøretøy.

5.2.1. Sammenligning av varebiler og lastesykler

Lastesykler og varebiler har ulike forutsetninger. Dette omfatter kapasitet, hastighet, fremkommelighet og parkeringsmuligheter for de ulike kjøretøyene. Dette påvirker igjen hvor effektivt ordre leveres og hvilke oppgaver som er mest tidskrevende.

Tidsbruken for leveransene i scenariene består av tre deler, servicetid for ordre, reisetid og servicetid ved rutefornyelser, start og slutt ved depot. Den totale tiden et kjøretøy bruker er begrenset av enten; 1: maksimal total tid, en begrensning satt for hvert kjøretøy i et scenario på et gitt antall minutter, eller 2: antall ordre, når alle leveranser er utført er «arbeidsdagen» over. I scenariene er tiden begrenset av begge tilfellene, dette varierer mellom dager og kjøretøy. Simuleringen for alle scenariene i ArcMap er utført med fire kjøretøy, men scenariene med lastesykkel har benyttet et kjøretøy mer (en lastebil, benyttet i tillegg til 4 lastesykler), som utfører leveranser som er ekskludert fra disse scenariene på grunn av vekt- og volumbegrensninger som er satt. Den gjennomsnittlige totale tiden som er benyttet for å utføre leveransene varierer for hvert scenario med omkring en time. At variasjonen i tid ikke er så stor mellom de ulike

scenariene er en konsekvens av grensen for maksimal tid som er satt for hvert enkelt kjøretøy. Dermed må forskjellen i effektivitet for de ulike scenariene tolkes sammen med andre resultater, slik som ordre behandlet og ubehandlet.

For scenario 1, 2 og 3 som ikke har noen spesielle restriksjoner for kjøretøyene er det scenario 3, lastesykler med to skap som benytter minst tid totalt. Gjennomsnittlig total tid benyttet per dag for disse scenariene varierer med litt over en time, med gjennomsnittlig tidsbruk per dag for alle kjøretøy på 22,4, 23,1 og 21,9 timer for scenario 1-3. Dette viser at lastesykler er konkurransedyktige for vareleveranse under dagens forhold. Men som diskutert i delkapittel 5.1.1, må en ta med i vurderingen at inputdata, hvorav noen er estimert påvirker disse resultatene.

I scenario 4 har hvert kjøretøy kortere maksimal tid å benytte og den totale tidsbruken er dermed lavere i resultatene fra ArcMap. For scenariet er det antatt at dårligere fremkommelighet påvirker hvert kjøretøy med 40 minutter per arbeidsdag, ved å addere dette med resultatene fra ArcMap benytter kjøretøyene i scenario 4 nesten to timer mer per dag sammenlignet med lastesyklene i scenario 3. Tidsbruken for scenario 5 blir påvirket av at flere pakker er utenfor rekkevidde, som betyr at VRP-verktøyet ikke tar hensyn til disse leveransene i kalkuleringen av rutevalg og fordeling av ordre mellom kjøretøy. Dette påvirker totalt tid som er gjennomsnittlig 30 minutter mindre per dag enn for scenario 1. Disse leveransene kan antas å være noe mer tidskrevende enn andre leveranser, som betyr at den totale tiden for scenario 5 ville vært høyere om verktøyet hadde tatt med disse leveransene. Som forventet for scenariene med varebil, bruker scenario 1 minst total tid for å utføre leveransene. Når en vurderer alle scenariene, er det scenario 3 med lastesykkel som benyttet minst tid totalt.

I Tabell 12 vises den prosentvise fordelingen av tiden mellom ulike poster. Fra den prosentvise fordelingen for de ulike delene av leveranseprosessen er det en markant forskjell mellom hvordan tidsbruken er fordelt for varebil og lastesykkel.

Scenario	s1	s2	s3	s4	s5
Kjøretøy	varebil	lastesykkel 1 skap	lastesykkel 2 skap	varebil	varebil
% av total tid for servicetid ordre	90	60	66	90	89
% av total tid for reisetid	4	23	22	4	4
% av total tid servicetid start og slutt depot og rutefornyelser	6	17	12	6	7

Tabell 12: Prosentvis fordeling av tidsbruk

Scenariene som benytter varebil (1, 4 og 5), har omtrent den samme fordelingen mellom de ulike oppgaven. Fordelingen av tidsbruken viser at det er en stor forskjell mellom lastesykkel og varebil i hvilke oppgaver som er tidskrevende for de ulike kjøretøyene. Den totale tidsbruken i minutter er relativt lik for alle scenariene, og fra den prosentvise fordelingen kan en se at varebiler bruker mindre tid på reise og rutefornyelser, men lastesykler benytter vesentlig mindre tid på servicetid for ordre. Fra inputverdiene er det fastslått at lastesykler benytter mindre tid per leveranse. Dette på grunn av større muligheter for parkering og enklere fremkommelighet. De påvirkes i mindre grad av sirkuleringsproblematikk, da de i prinsippet kan parkere hvor som helst. Dette fører til en stor forskjell i tid brukt på servicetid for leveranser mellom lastesykkel og bil. På grunn av vesentlig lavere kapasitet enn biler vil lastesyklene returnere til depotet flere ganger i løpet av en arbeidsdag og tilbakelegge lengre reisevei. På grunn av

lavere hastighet og flere kilometer tilbakelagt vil en større del av den totale tiden gå med til reisetid. At lastesyklene returnerer til depotet for å laste leveranser på nytt i løpet av en arbeidsdag, fører også til mere tid benyttet for servicetid ved depot. Det er en vesentlig større forskjell innad mellom scenario 2 og 3 hvor lastesykkel benyttes sammenlignet med scenariene med varebil. Scenario 2 benytter lastesykkel med kapasitet på 0,8 liter og 150 kg og scenario 3 benytter lastesykkel med kapasitet på 1,6 liter og 300 kg. Kapasitetsforskjellen fører til ulikt behov for påfyll av ordre, som fører til at de mindre lastesyklene har behov for å returnere til depot oftere. Dette påvirker reiselengde og tid bruk på rutefornyelser.

Den mest tidskrevende oppgaven for alle kjøretøy er selve leveransen. Hva som defineres som tid brukt på en leveranse varierer, men består av tiden fra kjøretøyet har parkert til det beveger seg igjen, men en kan også inkludere tid brukt på sirkulering for å finne parkeringsplass. Dette er antatt å være en mer tidseffektiv oppgave ved bruk av lastesykler, da en enklere finner parkering, gjerne nærmere leveringsadressen. Fra data benyttet i denne oppgaven er det vist at lastesykler er opp til flere minutter raskere for hver leveranse enn biler. Andre studier har også antatt en vesentlig forskjell i tiden benyttet for å utføre hver enkelt leveranse (Elbert og Friedrich, 2019). Restriksjoner for biler vil også medføre at lastesykler blir mer gunstige å benytte. Et eksempel er flere gater med brede fortau hvor parkering for biler ikke er prioritert, dette påvirker biler negativt i stor grad da det både blir vanskeligere å finne parkeringsplass, men også gjerne parkering lengre bort fra der ordre skal leveres. Økt trafikk vil også påvirke biler i større grad enn lastesykler, og vil øke tiden varebiler bruker mellom hver stopp.

Lastesykler har muligheten til å levere en stor andel av leveranser i et bysentrum. Bestemmelser benyttet i denne oppgaven tilsier at over 90% av ordrene fra leveransedata benyttet i denne oppgaven kan leveres med bruk av lastesykkel etter valg av begrensning på volum og vekt på henholdsvis maks 100 liter og 23 kg. Simuleringene som utføres for de fem scenariene benytter leveransedata for fem ulike dager, antallet leveranser per dag varierer mellom 506 – 698. For fem dager er det totale antallet leveranser 2983, hvorav 212 leveranser er ekskludert fra simuleringene med lastesykkel. Det er flere ordre som er ubehandlet i simuleringene, det kan være to årsaker til det. Enten er maksimal total tid benyttet, eller så kan ordre være utenfor rekkevidde for nettverkene som er bygd opp i rutevalgmodellen. I de aller fleste tilfeller er overskredet maksimal tidsbruk årsaken til at ordre er ubehandlet. Som tidligere nevnt har ikke lastesykler muligheten til å håndtere alle typer leveranser, og kombinasjon av lastesykler og varebiler er nødvendig. Den prosentvise forflytningen fra bil over til lastesykkel vil være avgjørende med tanke på behovet for ulike kjøretøy. Hvilke leveranser som er ansett som håndterbare for lastesykkel er definert av vekt og volum for hver enkelt ordre, men kan også inkludere et krav om hvor mange leveranser som skal bringes med i hver enkelt tur fra depot. Slike bestemmelser påvirker hvor mange lastesykler og varebiler som er nødvendig. Historisk leveransedata med informasjon om antall, volum og vekt kan benyttes for å kartlegge behov for det enkelte transportfirmaet.

Fra resultatene fra simuleringene som er utført er scenariene som har færrest ubehandlede ordre (ikke levert) totalt i ArcMap er scenario 1 og 3, med henholdsvis 83 og 58 stk. ubehandlede ordre totalt. Scenario 4 har flest ordrer ubehandlet med 230. Dagene med høyest leveransebehov (10.01 med 651 og 22.01 med 698 ordre), har ubehandlede ordre for alle scenariene. Ubearbejdede ordre er ikke tatt hensyn til i simuleringene. Eksempelvis kan disse håndteres ved å overføres til dagen etter, eller for dager med få ubehandlede leveranse, kan en anta at ubehandlede ordre ville blitt tatt hånd om uten store forskjeller i den totale tiden. For å kunne levere alle ordre, og samtidig benytte lastesykkel må det også utføres leveranser med varebil. Disse ordrene er fjernet fra simuleringene med lastesykkel og må utføres av et ekstra kjøretøy som har

kapasitet til å frakte større ordre. Resultatene indikerer at lastesykler kan utføre vareleveranser like- og mer effektivt enn varebiler, men resultatene indikerer at for å utføre de samme leveransene vil det være et behov for flere kjøretøy for å kunne benytte lastesykkler i vareleveranse. I scenariene i denne oppgaven er det for scenario 2 og 3 benyttet 4 lastesykler og 1 varebil, mens i scenario 1, 4 og 5 brukes det 4 varebiler.

Verdiene for behandlede ordre sammen med tidsbruken gir en indikator på hvilke av scenariene som har best leveringsevne. Fra disse verdiene er den gjennomsnittlige tiden per ordre regnet ut. For scenariene med varebil er den som følger, scenario 1: 2,32 minutter, scenario 4: 2,58 minutter og scenario 5: 2,33 minutter. Scenario 5 har flere leveranser som er ubehandlet, men for leveransene som er utført skiller det minimal forskjell mellom scenario 1 og 5. Dette kan antas å bety at minsket fremkommelighet i noen gater, slik som modellert i scenario 5 generelt ikke påvirker leveransene og tidsbruken, foruten ordre som skal leveres til gater der man ikke kan kjøre bil. Dette har ikke kommet frem i resultatene i tidsbruken, da verktøyet ikke har utført disse på grunn av begrensninger. Som forventet er det i scenario 4 benyttet vesentlig mer tid på hver enkelt leveranse, da det er anslått en økt tidsbruk på grunn av mer trafikk og økt sirkuleringsproblematikk. For scenario 2 og 3, hvor lastesykler er benyttet er gjennomsnittlig tid per ordre 2,64 minutter og 2,41 minutter. Fra disse verdiene og generelt fra verdiene om tidsbruk og ordrebehandling, kan man anta at den doble kapasiteten til lastesyklene i scenario 3 ikke utgjør en veldig stor forskjell fra scenario 2, men de leverer varer mer effektivt. Sammenlignet med scenario 4, der økt trafikk påvirker leveringstiden for varebil, er scenariene med lastesykkler konkurransedyktige når man sammenligner verdier for gjennomsnittlig tid per ordre. Dette forutsetter at den økte trafikken ikke påvirker lastesyklene.

En vesentlig forskjell mellom varebil og lastesykkler er behovet for å laste nye leveranser i løpet av en arbeidsdag. Rutefornyelser fører til at lastesykler benytter mer tid ved depot for lasting av nye ordre. Dette påvirker også tid brukt på reise, da behovet for påfyll av varer fører til ekstra turer til og fra depot, sammenlignet med varebil. Den totale reiselengde er relativt lik for scenariene med varebil. Scenario 4 har mindre tid i simuleringene, og dermed kortere reiselengde enn de andre scenariene. Mellom scenariene med bil og lastesykkler er det en vesentlig forskjell i reiselengde. Scenario 1, 4 og 5 med fire varebiler til sammen tilbakelegger omtrent 30 km per dag, men scenario 2 og 3 med fire lastesykler til sammen tilbakelegger henholdsvis 82 og 52,5 km per dag. Reiselengden påvirker effektiviteten for et kjøretøy med tanke på tidsbruk. En annen betydning reiselengde har er dens påvirkning opp mot kostnader for kjøretøyene. Reiselengde skaper kostnader i form av behov for vedlikehold og driftsutgifter som drivstoff og lading.

5.2.2. Effekt av type lastesykkler

Som diskutert i forrige delkapittel ble lastesykler med to forskjellige kapasiteter vurdert i scenariene. Det finnes mange ulike typer lastesykler, og for kommersielle firma kan det være aktuelt med tilpassede kjøretøy. I scenario 2 er leveransene simulert med lastesykler som har kapasitet på 0,8 m³ og 150 kg. Scenario 3 simulerer leveranser med lastesykler med kapasitet på 1,6 m³ og 300 kg, dobbelt kapasitet sammenlignet med scenario 2. Ulike størrelser på lastesykler gir også fordeler og ulemper som kan sees i resultatene fra scenariene. Lastesykkler med to skap kan bringe med flere leveranser på en tur, noe som gir mindre reiselengde da den sjeldnere må returnere til depot for å laste inn nye leveranser. Dette gjør at de får utført flere leveranser i løpet av en arbeidsdag. Fra scenariene har lastesykler med et skap omkring 20 flere ubehandlede leveranser per dag. Behovet for å laste nye varer fører også til lengre reisevei og tid brukt ved depot.

Dette gjør at lastesyklene benyttet i scenario 3 får utført leveransene mer effektivt, og som nevnt i delkapittel 5.2.1 er tiden benyttet per ordre 2,64 minutter for scenario 2 og 2,41 minutter for scenario 3.

Størrelsen på lastesyklene kan også gå utover fremkommeligheten negativt, større og tyngre lastesykler er antatt til å være tregere og en kan også anta at de er vanskeligere å manøvrere og parkere. Dette påvirker reisen rundt i et bysentrum hvor eksempelvis bil-, sykkel- og gangtrafikk og kantsteiner kan gi større utfordringer for tyngre og større sykler. Dette er et aspekt som variere fra by til by, og avhenger av utforming på veier og fortau. Det beste valget i sammensetning av kjøretøy kan baseres på en kombinasjon av effektivitet og brukervennlighet.

5.2.3. Effekten av mindre gunstige forhold for motoriserte kjøretøy i urbane områder

Scenariene ser også på hvordan ulike forutsetninger påvirker leveranse med varebil. Scenariene vurderer ulike forhold som økt trafikk og flere restriksjoner på motoriserte kjøretøy i bysentrum. For enkelt å kunne sammenligne de ulike forutsetningene er det benyttet samme antall og type varebil for scenario 1, 4 og 5. Scenario 1 har nåværende fremkommelighet, scenario 4 har mindre leveringstid for hvert enkelt kjøretøy for å illustrere et bysentrum med generelt dårligere fremkommelighet og scenario 5 illustrerer dårligere fremkommelighet ved færre veivalg, hvor noen gater er stengt av for biltrafikk.

Scenario 4 illustrerer et bysentrum hvor vareleveranser i større grad bli påvirket av eksempelvis økt trafikk og færre losse- og lastelommer. Dette er faktorer som påvirker vareleveringen i hele området. Dette blir uttrykt i modellen med mindre maksimal tid for hvert kjøretøy. Sammenlignet med scenario 1 med nåværende fremkommelighet er det i snitt 30 flere ubehandlede ordre per dag og hver leveranse tar i snitt omtrent 16 sekunder mer som utgjør over 2 timer på en dag med 500 leveranser. Resultatene viser at faktorer som gir dårligere fremkommelighet og parkeringsmuligheter påvirker leveringsevnen for varebil i stor grad. I scenario 5 er det påført restriksjoner for noen gater i nettverket. Dette fører til at de ikke kan benyttes av kjøretøyene. Sammenlignet med scenario 1 med nåværende fremkommelighet er det i snitt 17 flere ubehandlede ordre per dag og hver leveranse tar i snitt 2,33 minutter. Dette er en minimal forskjell sammenlignet med scenario 1, hvor tid per ordre er 2,32 minutter. Ved å stenge av veier for biltrafikk påvirkes kun leveransene i et lite område rundt de aktuelle begrensningene. Leveranser til resten av bysentrumet er relativt lite berørt. Dette krever noen mer tid for å utføre leveranser i de områdene som blir påvirket av restriksjoner, noe som ikke kommer frem i resultatene. I snitt er det 24 leveranser per dag som er utenfor rekkevidde for VRP-verktøyet i ArcMap, og blir dermed ikke tatt hensyn til. Dette fører til at disse leveransene ikke blir utført, og påvirker da heller ikke tidsbruken. Dette er en faktor som minsker forskjellen mellom de to scenariene. Generelt viser resultatene fra de tre scenariene med varebil at faktorer som økt trafikk påvirker vareleveransene i større grad enn eksempelvis stenging for biltrafikk i noen gater, selv om det må bemerkes at disse resultatene også er avhengig av hvilke gater som gis begrensninger.

5.2.4. Kostnader

En oversikt over økonomiske forskjeller mellom de ulike scenarioene er ikke vurdert. Kostnader for ulike poster som for eksempel sjåfører og syklister, kjøretøy, drivstoff og vedlikehold er ikke innhentet, men generelle antakelser og kunnskap gir grunnlag for overordnet å diskutere utgifter for de ulike scenariene og kjøretøyene. For å utføre leveransene er det for scenario 1, 4 og 5 benyttet fire varebiler. For scenario 2 og 3 er

det benyttet fem kjøretøy, fire lastesykler og en varebil som utfører det som er kalt teoretiske leveranser. Kjøretøysflåten påvirker kostnader på to forskjellige måter, faste kostnader som kjøpskostnad/leasingkostnad for hvert kjøretøy og varierende kostnader som time- eller distansekostnader for lønn, drivstoff, bompenger, service og vedlikehold. Kostanden for de ulike postene varierer ut ifra antall og type kjøretøy. Her kan en generelt anta at lastesykler er billigere kjøretøy enn biler på grunn av vesentlig lavere kjøps- og driftskostnader. På den andre siden vil behovet for antall kjøretøy gi et behov for antall ansatte, som er en stor utgift. Ved bruk av lastesykler vil det være et behov for et ekstra kjøretøy for å kunne utføre de samme leveransene. Et annet behov som lastesykler skaper er et sentralt depot, hvor det vil være utgifter for tomt og bygningsmasse. Dette betyr at de ulike sammensetningene av kjøretøy har både kostnadsbesparende og kostnadsøkende karakteristikk. Andre studier viser at lastesykler kan være like og mer kostnadseffektive, selv om det i de fleste tilfeller fører til en ekstra utgift for leie av sentralt depot. Uansett antyder litteraturen at ved valg av rett løsning og andel varer som forflyttes over til lastesykkler er det i de fleste tilfeller økonomisk gunstigere enn eksisterende løsninger. (Arnold *et al.*, 2018; Hofmann *et al.*, 2017; Melo og Baptista, 2017; Ørving *et al.*, 2018)

En delvis utbytting fra større kjøretøy til lastesykler kan også gi andre positive ringvirkninger. I et bysentrum med begrenset tilgang til parkeringer eller andre avlastningsmuligheter vil en nedgang i antall kjøretøy som benytter disse ha en positiv ringvirkning for de gjenværende. Ved færre brukere av disse plassene kan en anta at det blir enklere å finne parkering og dette vil minske tidsbruken for sirkulering, samtidig som det øker sjansen for å kunne parkere nærmere leveringsadressen. Ringvirkninger på klima, lokal forurensning og trafiksikkerhet er heller ikke sett på i denne studien, men det er fra flere prosjekter hvor lastesykler er implementert og data fra lignende forstudier fastslått en vesentlig nedgang i utslipp og støy (Hofmann *et al.*, 2017; Maes og Vanelander, 2012; Arnold *et al.*, 2018).

5.2.5. Depotets funksjon og betydning

Lastesykkler og varebil har mange ulikheter. En vesentlig forskjell er hastighet og kapasitet. Kapasiteten for en lastesykkle er rundt 10 – 20% av en varebils. Dette gir et behov for påfyll av varer fra et depot flere ganger i løpet av en arbeidsdag. Turene til depot bidrar til at lastesykler tilbakelegger en lengre reisevei i løpet av en dag. Lastesykler er begrenset av øvre tillatt hastighet på 25 km/t, ved denne hastigheten skal hjelpemotor opphøre (Kjøretøyforskriften, 1994). Hastighetsforskjellen mellom biler og lastesykler gir ikke så store utslag i tidsbruk når avstander som tilbakelegges er relativt små, og hastigheten for bil er begrenset slik som i et bysentrum. For å begrense den negative effekten depotbesøk har for tidsbruken for lastesykkler opp mot varebil er et sentralt depot nødvendig. Et sentralt depot er lokalisert nærmere området hvor leveransene utføres, enn hva en tradisjonell distribusjonssenter er. Dette minimerer tiden benyttet for påfyll av varer i løpet av en arbeidsdag, og er også et sted som kan fungere som arbeidssted, oppholdsplass ved pauser, serviceområdet for kjøretøy og omlastningspunkt fra større til mindre kjøretøy. Fra prosjekter som har tatt i bruk lastesykkler er et viktig aspekt for sentrale terminaler eller depot leiepris for tomt og/eller bygningsmasse. Det er benyttet ulike tiltak og løsninger som offentlig støtte eller flerbruksløsninger som kan bidra til å senke kostnader hvor det er funnet nødvendig (Tale *et al.*, 2018; Ørving *et al.*, 2018).

Depotet som er lagt inn i simuleringene er lokalisert på Brattøra. Tidsbruken for hvert «besøk» på depotet er satt til 10 minutter for alle kjøretøy. Besøk på depot består av start og slutt på arbeidsdagen samt rutefornyelser. Rutefornyelser og start på

arbeidsdagen gir til sammen informasjon om antall turer for kjøretøyene. I scenario 2 og 3 med lastesykler har hvert enkelt kjøretøy to eller flere turer per dag, som vil si at de returnerer til depotet for å laste nye leveranser i løpet av en arbeidsdag. For scenario 2 som simulerer leveranser med lastesykler med kapasitet på 0,8 m³ og 150 kg varierer antall turer per dag, per kjøretøy mellom fire og syv. For scenario 3 som simulerer leveranser med lastesykler med kapasitet på 1,6 m³ og 300 kg varierer antall turer per dag, per kjøretøy mellom to og fire. Scenariene med varebil benytter seg som regel kun av en tur per kjøretøy, i noen tilfeller to. Dette betyr at lokasjon på depot ikke har så stor innvirkning på reiselengde og reisetid for varebiler på grunn av færre besøk, for lastesykkler har lokasjonen en større betydning.

En annen verdi som er vurdert med tanke på depotets lokasjon er reisetid og reiselengde fra depot til første og siste leveranse på en tur for scenariene med lastesykkler.

Scenario 2 har en gjennomsnittlig avstand mellom siste leveranse før depotbesøk og depot på 1,13 km og tidsbruk på 4,35 minutter. For en sykkel på en gjennomsnittlig dag med ca. 5 turer utgjør det 5,65 km og 21,75 minutter for at kjøretøyet skal tilbake til depot for å lastes med nye leveranser og avslutte arbeidsdagen.

Ved å se på leveranser for en spesifikk dag for scenario 2, er det gått dypere inn i avstander mellom hver enkelt leveranse. Fra leveransene for 22. januar er det sett på avstand fra depot til første leveranse for alle turer, dataen er lagt ved i Vedlegg 4: Ordre etter depotbesøk, scenario 2, 22. januar. Gjennomsnittlig avstand og tidsbruk mellom depot og første leveranse er på henholdsvis 1,31 km og 5,08 minutter. For en sykkel på en gjennomsnittlig dag med 5 turer utgjør det 6,55 km og 25,4 minutter. Ved bruk av de overnevnte verdiene vil det for 22. januar tilbakelegges 12,2 km i reisevei til og fra depot. For de fire lastesyklene utgjør dette 48,8 km, som er over 50% av distansen som tilbakelegges totalt. For lastesykler som utfører flere turer i løpet av en dag kan man se fra disse verdiene at depotets lokasjon kan utgjøre en viktig forskjell. En økning i avstand fra depot til bysentrum på eksempelvis 0,5 km anslås å utgjøre 5 km ekstra reisevei for fem turer til og fra depot. Med en gjennomsnittshastighet på 15,5 km/t utgjør dette 19,4 minutter for hver lastesykkler.

At det gjennomgående er et behov for å laste nye varer i løpet av en arbeidsdag for lastesykkler indikerer at depotets lokasjon er viktig for at lastesykler skal kunne være konkurransedyktige opp mot leveranser med bil. Et usentralt depot vil gi lengre reisevei og ved flere daglige besøk utgjør dette en vesentlig forskjell.

6. Videre arbeid

I tillegg til hva som er brakt frem i diskusjonskapitlet vil det videre bli fremmet forslag til videre arbeid. Arbeidet utført i denne oppgaven har inkludert utviklingen av en rutevalgmodell, og bruken av denne til å vurdere ulike scenarier. Denne kan videreføres som en helhet eller delvis. Dette omfatter videre arbeid omhandlende bruken av lastesykler i varedistribusjon, og bruken av rutevalgmodellen og data som er innhentet og bearbeidet, deler av dette kan også benyttes til studier med andre hensikter.

Rutevalgmodellen som er benyttet i simuleringen av scenariene består av flere ulike nettverk og leveransedata. Nettverkene er bygd opp fra eksisterende nettverk og er lagt til data som hastighet og restriksjoner for veivalg. I scenariene er det benyttet innhentet data som dekker kapasitet for kjøretøy og restriksjoner i form av arbeidstid og tidsbruk for ulike oppgaver.

Resultater fra analyser er et resultat av dataen som er benyttet, nøyaktigheten av denne påvirker resultatene. Innhenting av mer informasjon og utførelse av tids- og fartsmålinger for ulike inputdata kan bidra til å gjøre modellen mer nøyaktig.

I delkapitlet 5.1.1 Inputdata – påvirkning av resultat er det diskutert hvordan ulik inputdata og valg påvirker resultater. Tid bruk på leveranser er vurdert til å ha stor påvirkning på den endelige resultat. Tilsvarende målinger for tid bruk på leveranser for ulike kjøretøy kan bli gjennomført for å få verdier som tilsvarer nøyaktig den samme delen av leveringsprosessen. Andre verdier av interesse kan være målinger av hastighet for ulike kjøretøy i bysentrum, tid brukt på sirkulering og utnyttelsesgrad av lastekapasitet til forskjellige kjøretøy.

I delkapittel 5.1.2 er bruken av ArcMap vurdert, tidsaspektet for oppgaven har begrenset muligheten for å løse noen av de nevnte problemene. Videre kan det jobbes med å lage modellen enda mer brukervennlig. Et behov kan være å lage en løsning som kan gjennomføre hybridløsninger, slik at en kan se på scenarier med begge typer kjøretøy i en løsning i VRP verktøyet. Det er usikkert om dette kan gjennomføres i funksjonene som finnes i ArcMap, eller om andre verktøy er nødvendig.

I noen simuleringer har ordre havnet utenfor rekkevidde når nettverket er påført restriksjoner for fremkommelighet. Dette er noen det kan arbeides videre med, eksempelvis med et konnektivt nettverk hvor et gangnettverk utfyller bilnettverket. Gangnettverket vil da ha andre parameter for hastighet, eksempelvis 5-6 km/t som supplement til de delene bilnettverket ikke dekker, som gågater og gater forbeholdt kollektivtransport.

Nye aspekter kan også bli tilført, dette kan bidra til at rutevalgmodellen kan benyttes for å gi et bedre og bredere grunnlag i sammenligningen mellom lastesykkel og større kjøretøy. Innhentet data inkluderer i liten grad kostnader, og dette er et viktig aspekt som det kan arbeides videre med. Påvirkningen på lokal forurensing og klimagassutslipp er også aspekter som modellen kan benyttes til å fastslå. Dette kan eksempelvis være utslipp fra ulike kjøretøy og livssyklusanalyser.

Simuleringene er begrenset til å kun se på leveranser innad i Trondheim sentrum. I transportkjeden vil det også være tidsbruk og kostnader knyttet opp mot frakt av leveranser til et bylogistikkdepot. For scenariene med bil vil en også kunne anta at et bylogistikkdepot ikke nødvendigvis ville blitt benyttet, og heller ha utgangspunkt fra en terminal i utkanten av byen. Leveransedataen er som nevnt begrenset til Trondheim sentrum. Dette medfører at en ikke ser på effekten av å benytte lastesykler opp mot bil utenfor disse området. I Trondheim kan aktuelle områder for denne typen leveranse også

være Solsiden og Bakklandet hvor fremkommelighet med bil i flere områder er begrenset. Dette er aspekter som er utelatt i denne studien, men som kan være av interesse i videre arbeid.

7. Konklusjon

Gjennom denne studien har det blitt sett på mulighet og konkurransedyktighet for bruken av lastesykkel i varetransport. Formålet med studien var å utvikle en rutevalgmodell som ble benyttet til å gjennomføre ulike scenarier hvor lastesykkel og varebil ble benyttet med ulike forutsetninger. Dette ble videre benyttet til å diskutere bruken av lastesykkel i urban varetransport.

Utviklingen av rutevalgmodellen og hvordan denne kan benyttes er en stor del av bidraget til oppgaven, og kan videre benyttes for å studere lastesykler i urban varetransport i Trondheim. Fra scenariene som er gjennomført i modellen er det hentet ut resultater som gir et grunnlag til å vurdere aspekter, om og hvordan lastesykler kan tas i bruk.

- En rutevalgmodell er en fleksibel måte å teste ulike scenarier på, og kan bidra til å finne gode løsninger for varetransport før de er tatt i bruk.
- Lastesykler er konkurransedyktige med varebiler når det kommer til effektivitet i vareleveranse. For å oppnå dette må det benyttes en kombinasjon av lastesykler og varebiler da noen ordre vil være for store (i størrelse og/eller vekt) til å bli levert med lastesykkel.
- En viktig fordel med lastesykler er tidsbruken per leveranse. Da lastesykler ikke behøver å benytte seg av oppsatte parkeringer og losse- og lastelommer kan de enklere finne parkering, gjerne nærmere leveringsadresse.
- Et sentralt depot er nødvendig for at lastesykler kan være konkurransedyktige, da det er behov for å laste varer på nytt opptil flere ganger i løpet av en dag. Et sentralt depot bidrar også med å minimere reiselengde, som igjen påvirker tidsbruk og økonomi.

En rutevalgmodell slik som utviklet i denne oppgaven kan gi god innsikt i evaluering av nye løsninger, på en effektiv og fleksible måte. Lastesykler kan være en av mange nye løsninger som kan bidra til mer bærekraftig urban vareleveranse. Lastesykler er en effektiv og miljøvennlig leveransemetode som kan bidra til mindre trafikk i urbane områder, som igjen har positive ringvirkninger.

Litteraturliste

- About OpenStreetMap*. Tilgjengelig fra: <https://www.openstreetmap.org/about> (Hentet: 23.06 2020).
- Andreassen, L. (2003) *ATP Modellen og sykkelplanlegging*. Tilgjengelig fra: <http://www.atpmodell.no/Referater/10des03/Presentasjon/sykkel.pdf> (Hentet: 10.02 2020).
- Arnold, F. et al. (2018) Simulation of B2C e-commerce distribution in Antwerp using cargo bikes and delivery points, *An Open Access Journal*, 10(1), s. 1-13. doi: 10.1007/s12544-017-0272-6.
- Barone, R. og Roach, E. (2016) Why Goods Movement Matters: Strategies for Moving Goods in Metropolitan Areas. Tilgjengelig fra: <https://rpa.org/uploads/pdfs/Why-Goods-Movement-Matters-ENG.pdf>.
- Braekers, K., Ramaekers, K. og Van Nieuwenhuysse, I. (2016) The vehicle routing problem: State of the art classification and review, *Computers & Industrial Engineering*, 99, s. 300-313.
- Browne, M. et al. (2019) *Urban logistics : management, policy and innovation in a rapidly changing environment*. London, United Kingdom ;,New York, NY ;,New Delhi, India: Kogan Page.
- Citroën *Citroën Jumper*. Tilgjengelig fra: <https://varebil.citroen.no/varebiler/modeller/citroen-jumper.html> (Hentet: 24.03 2020).
- Dybdalen, Å. og Ryeng, E. (2019) Lastesykler på norsk vinterføre: NTNU.
- Elbert, R. og Friedrich, C. (2019) *Urban consolidation and cargo bikes: a simulation study*. Darmstadt Technical University, Department of Business Administration
- Esri (2019a) *Algorithms used by the ArcGIS Network Analyst extension*. Tilgjengelig fra: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/extensions/network-analyst/algorithms-used-by-network-analyst.htm#GUID-2A732430-E67E-4269-AB69-027A79EF9F75> (Hentet: 18.02 2020).
- Esri (2019b) *Vehicle routing problem analysis*. Tilgjengelig fra: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/extensions/network-analyst/vehicle-routing-problem.htm> (Hentet: 17.04 2020).
- Fikar, C., Hirsch, P. og Gronalt, M. (2018) A decision support system to investigate dynamic last-mile distribution facilitating cargo-bikes, *International Journal of Logistics Research and Applications*, 21(3), s. 300-317. doi: 10.1080/13675567.2017.1395830.
- Flügel, S. et al. (2017) Fartsmodell for sykkel og elsykkel, *TØI*. Tilgjengelig fra: <https://www.toi.no/getfile.php?mmfileid=45144> (Hentet: 05.02.2020).
- Fossheim, K. et al. (2019) Hva trenger norske byer for å starte planlegging for bylogistikk? Tilgjengelig fra: <https://www.toi.no/getfile.php/1349679/Publikasjoner/T%C3%98I%20rapporter/2019/1679-2019/1679-2019-elektronisk.pdf>.
- Frøyen, Y. K. (2019) *Tips and hints – network editing. AAR4225 Samordnet areal- og transportplanlegging*. Tilgjengelig fra: <https://ntnu.blackboard.com> (Hentet: 20.02 2020).
- Frøyen, Y. K. (2019) *Network construction – using ATP-model functionality. AAR4225 Samordnet areal- og transportplanlegging*. Tilgjengelig fra: <https://ntnu.blackboard.com> (Hentet: 12.02 2020|).
- Gayialis, S. P., Konstantakopoulos, G. D. og Tatsiopoulos, I. P. (2019) Vehicle routing problem for urban freight transportation: A review of the recent literature *Operational Research in the Digital Era–ICT Challenges*. Springer, s. 89-104.
- GEONORGE *Kartkatalogen*. Tilgjengelig fra: <https://kartkatalog.geonorge.no/>, (Hentet: 29.01 2020).
- Hofmann, W. et al. (2017) A simulation tool to assess the integration of cargo bikes into an urban distribution system, i.

- Kim, G. et al. (2015) City vehicle routing problem (city VRP): A review, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(4), s. 1654-1666.
- Kirkels, M. (2016) *Short history of the cargo bike*. Tilgjengelig fra: <https://cargobikefestival.com/news/short-history-of-the-cargo-bike/> (Hentet: 24.05 2020).
- Kjøretøysforskriften (1994) *Forskrift om tekniske krav og godkjenning av kjøretøy, deler og utstyr*. Tilgjengelig fra: https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/1994-10-04-918/KAPITTEL_2#KAPITTEL_2 (Hentet: 31.10 2019).
- Lawler, E. L. et al. (1985) *The Traveling salesman problem : a guided tour of combinatorial optimization*. Chichester: Wiley.
- Liu, B. (2009) Vehicle routing problem, *Studies in Fuzziness and Soft Computing*, 239, s. 147-155. doi: 10.1007/978-3-540-89484-1_10.
- Maes, J. og Vanelslander, T. (2012) The Use of Bicycle Messengers in the Logistics Chain, Concepts Further Revised, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 39(C), s. 409-423. doi: 10.1016/j.sbspro.2012.03.118.
- Melo, S. og Baptista, P. (2017) Evaluating the impacts of using cargo cycles on urban logistics: integrating traffic, environmental and operational boundaries, *An Open Access Journal*, 9(2), s. 1-10. doi: 10.1007/s12544-017-0246-8.
- Microsoft (2020) *Hva er Access?* Tilgjengelig fra: <https://support.office.com/nb-no/article/video-hva-er-access-f2338765-ff59-4cfc-b8ba-74059fcb1874?ui=nb-NO&rs=nb-NO&ad=NO> (Hentet: 25.02 2020).
- Nasjonal vegdatabank (NVDB) (2020). Tilgjengelig fra: <https://www.vegvesen.no/fag/teknologi/nasjonal+vegdatabank> (Hentet: 23.06 2020).
- Presttun, T. et al. (2018) Nasjonal transportplan 2022-2033 BYLOGISTIKK. Tilgjengelig fra: https://www.vegvesen.no/fag/fokusomrader/nasjonal-transportplan/nasjonal-transportplan-2022-2033/attachment/2685762?ts=16a8d28c708&fast_title=Bylogistikk+-+delrapport+NTP+2022-2033.pdf (Hentet: 06.11.2019).
- Renault KANGOO Express. Tilgjengelig fra: <https://renault.no/admin/wp-content/uploads/2019/10/Master-hovedbrosjyre-2019-webV2.pdf> (Hentet: 24.03 2020).
- Romunstad, H. og Moe, C. (2020) *Varedistribusjon i bysentrum - Bruk og utforming av leveringsområder*, NTNU.
- Rudolph, C. og Gruber, J. (2017) Cargo cycles in commercial transport: Potentials, constraints, and recommendations, *Res. Transp. Bus. Manag.*, 24, s. 26-36. doi: 10.1016/j.rtbm.2017.06.003.
- Rundberget, A. N. et al. (2016) *Min sykkel er lastet med*. (Statens Vegvesens rapporter nr. 645). Tilgjengelig fra: https://www.vegvesen.no/attachment/1836153/binary/1179215?fast_title=Min+sykkel+er+lastet+med.pdf (Hentet: 09.11.2019).
- Schliwa, G. et al. (2015) Sustainable city logistics -- Making cargo cycles viable for urban freight transport, *Research in Transportation Business & Management*, 15, s. 50. doi: 10.1016/j.rtbm.2015.02.001.
- SSB (2019) *Tettsteders befolkning og areal*. Tilgjengelig fra: <https://www.ssb.no/befolkning/statistikker/befteft/aar> (Hentet: 24.05 2020).
- StreetScooter. Tilgjengelig fra: <https://www.streetscooter.com/de/modelle/work/> (Hentet: 24.03 2020).
- Tale, Ø. et al. (2018) Impact and process assessment of the seven CITYLAB implementations: 25274. doi: 10.13140/RG.2.2.30112.48647.
- Toth, P. og Vigo, D. (2002) *The vehicle routing problem*. SIAM.
- Transmodel *The purpose of the Transmodel Standard*. Tilgjengelig fra: <http://www.transmodel-cen.eu/overview> (Hentet: 12.05 2020).
- Vegkart. Tilgjengelig fra: <https://www.vegvesen.no/nvdb/vegkart/v2/#kartlag:geodata/@272680,7042222,12> (Hentet: 14.11 2019).

- Velvoe *Containerisation makes city logistics smart*. Tilgjengelig fra: <https://www.velove.se/containerisation-last-mile-solution> (Hentet: 10.11 2019).
- Ørnes, E. og Norddal, K. S. (2011) *Brukermanual ATP-modellen versjon 10.0*. Tilgjengelig fra: <http://www.atpmodell.no/documents/doc108.pdf> (Hentet: 20.02 2020).
- Ørving, T. *et al.* (2018) Evaluering av oppstartsperioden for varelevering med lastesykkel.
- Ørving, T. og Eidhammer, O. (2019) Evaluering av Oslo City Hub.

Vedlegg 1: Kode Access

FindNumber

```
Public Function FindNumber(InputValue As String) As String
    If (IsNull(InputValue)) Then Exit Function
    Static regex As Object
    If regex Is Nothing Then
        Set regex = CreateObject("vbscript.regexp")
        With regex
            .Global = False
            .IgnoreCase = True
        End With
    End If

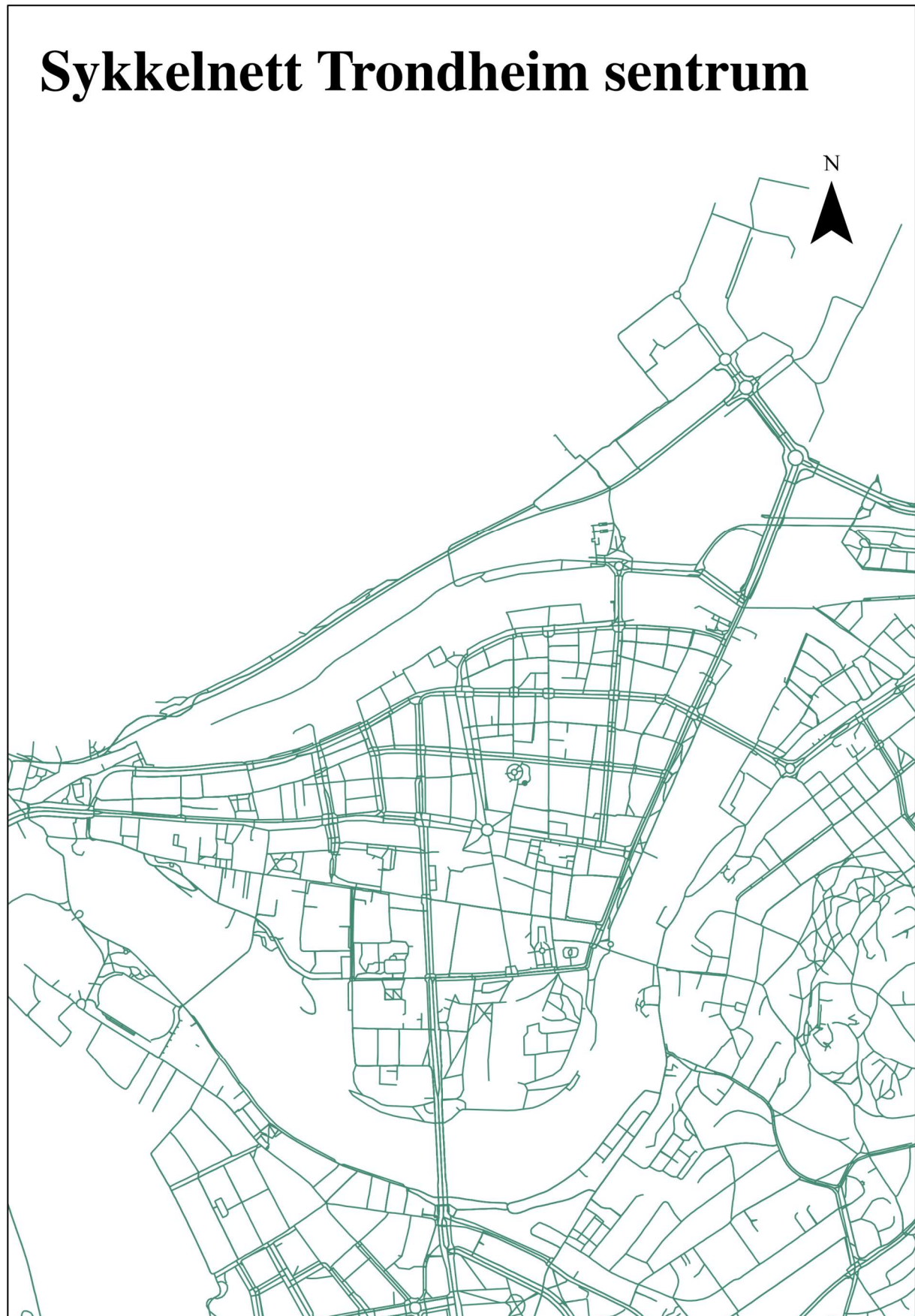
    If regex.Pattern <> "\s\d(Vegkart)" Then regex.Pattern =
"\s\d(Vegkart)"

    Set matches = regex.Execute(InputValue)
    If matches.Count > 0 Then
        FindNumber = matches(0).Value
    End If

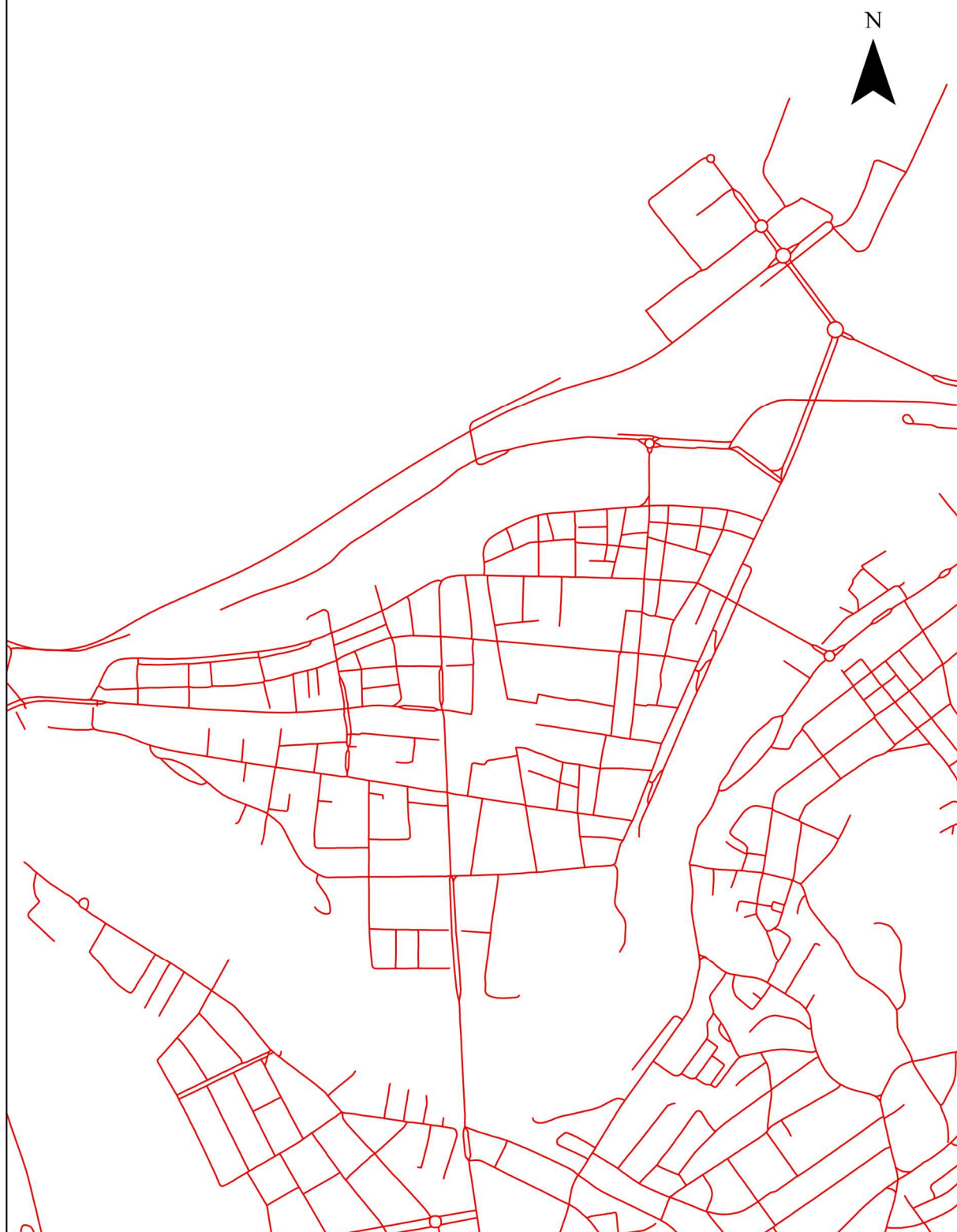
    If matches.Count = 0 Then
        FindNumber = ""
    End If

End Function
```

Vedlegg 2: Nettverk Trondheim sentrum



Bilnett Trondheim sentrum



Vedlegg 3: Eksempel leveransedata

Eksisterende felt												Felt lagt til				
TilpostNr	vekt_gram	volum_cm3	Fra_terminal	Fra_postnummer	ADRLINJEEDI1	ADRLINJEEDI2	Leveringsadresse	PDA_utlev	Dato_utlev	Tid_utlev	Antall_pakker	Adressekode_	Adressenummer	unik_id	x	y
7010	10450	45182	Logistikkcenter Trondheim	7093	PIR II 13 C		PIR II 13 C	OT29749	00:00:00	11:15:25	1	5967	13	1574	570357,8	7035494,91
7010	5000	43092	Logistikkcenter Trondheim	7093	HAVNEGATA 9	INNGANG 2 1 ETG.	HAVNEGATA 9	OT29749	00:00:00	11:54:46	1	2775	9	1562	569978	7035499
7011	5950	26910	Logistikkcenter Trondheim	7093	DRONNINGENS GATE 38	2. ETSJA	DRONNINGENS GATE 38	OT39022	00:00:00	11:44:19	1	1350	38	1593	569510	7034492
7011	850	18720	Logistikkcenter Trondheim	7093	OLAV TRYGVASSONSGT 3		OLAV TRYGVASSONSGT 3	OT37411	00:00:00	10:18:14	1	5540	3	1592	569988	7034618
7011	2200	12432	Logistikkcenter Trondheim	7093	OLAV TRYGVASSONSGT 19		OLAV TRYGVASSONSGT 19	OT37411	00:00:00	11:45:33	1	5540	19	1591	569801	7034611
7011	4600	18480	Logistikkcenter Trondheim	7093	MUNKEGATEN 50		MUNKEGATEN 50	OT39022	00:00:00	12:55:55	1	4900	50	1575	569537	7034531
7011	19550	88800	Logistikkcenter Trondheim	7093	DRONNINGENS GT. 15		DRONNINGENS GT. 15	OT39022	00:00:00	11:48:10	1	1350	15	3839	569503	7034462
7012	200	3800	Logistikkcenter Trondheim	7093	GUNNERUS GATE 1		GUNNERUS GATE 1	OT39022	00:00:00	10:09:23	1	2470	1	3855	569257	7034062
7011	5	990	Logistikkcenter Trondheim	7093	NORDREGATE 2		NORDREGATE 2	OT38416	00:00:00	10:36:19	1	5300	2	7016	569737	7034355
7010	3450	17316	Logistikkcenter Trondheim	7093	HAVNEGATA 9		HAVNEGATA 9	OT29749	00:00:00	12:22:57	1	2775	9	7012	569978	7035499
7013	200	0	Logistikkcenter Trondheim	7093	KJOPMANNSGATA 10,		KJOPMANNSGATA 10,	OT36501	00:00:00	11:14:44	1	3720	10	7011	569867	7034116
7011	2850	23010	Logistikkcenter Trondheim	7093	OLAV TRYGGVASSONSGATE 12		OLAV TRYGGVASSONSGATE 12	OT37411	00:00:00	11:56:33	1	5540	12	1596	569879,6	7034646,9
7011	600	3432	Logistikkcenter Trondheim	7093	SONDRE GT 18		SONDRE GT 18	OT37550	00:00:00	12:33:13	1	7370	18	7009	569855	7034600
7010	13450	31500	Logistikkcenter Trondheim	7093	HAVNEGATA 9, 2 ETG.		HAVNEGATA 9, 2 ETG.	OT29749	00:00:00	12:26:11	1	2775	9	7019	569978	7035499
7012	1900	105780	Logistikkcenter Trondheim	7093	GUNNERUS GATE 1 VAREMOTTAK		GUNNERUS GATE 1 VAREMOTTAK	OT39022	00:00:00	10:18:35	1	2470	1	1573	569257	7034062
7010	1650	18600	Logistikkcenter Trondheim	7093	BRATTORKAIA 13B PIRTERMINALEN		BRATTORKAIA 13B PIRTERMINALEN	OT29749	00:00:00	13:34:27	1	1179	13	1572	569973	7035302

Vedlegg 4: Ordre etter depotbesøk, scenario 2, 22. januar

Description	ServiceTime	RouteName	Etter depot	Sequence	FromPrevTravelTime	FromPrevDistance	CumulTravelTime
Munkegate 9	1,5	Sykkel1	X	2	7,551284483	1,916762806	7,551284483
KJØPMANNSGATA 61	2,5	Sykkel1	X	28	4,898862913	1,279083854	24,26787062
Olav Tryggvasonsgt 3	1,5	Sykkel1	X	45	4,916475937	1,259904287	37,49571951
OLAV TRYGGVASONSGT.18	2,5	Sykkel1	X	71	5,636113603	1,44972942	50,18898012
OLAV TRYGGVASONSGT 3	1,5	Sykkel1	X	100	4,916475937	1,259904287	62,47166306
OLAV TRYGGVASONSGATE 2 B	1,5	Sykkel1	X	119	4,901177807	1,246528326	74,40907425
CARL JOHANS GATE 6	1,5	Sykkel2	X	2	5,42881299	1,401102681	5,42881299
Gryta 4	1,5	Sykkel2	X	23	3,731619872	0,971200445	16,84559226
Fjordgata 22	2,5	Sykkel2	X	74	4,566208849	1,17396297	34,83330352
HAVNEGATA 1	1,5	Sykkel2	X	106	3,443461282	0,90310062	46,7730269
HAVNEG 7	1,5	Sykkel2	X	141	1,363472821	0,358216008	65,0147062
GRYTA 4	1,5	Sykkel3	X	2	3,731619872	0,971200445	3,731619872
Munkegata 22	1,5	Sykkel3	X	13	7,602557352	1,936347021	14,99516673
THOMAS ANGELLS GATE 21	1,5	Sykkel3	X	35	6,600396268	1,695936275	29,14577874
Dronningensgate 3	1,5	Sykkel3	X	55	5,895373719	1,503138622	42,22981134
Havnegata 1-3	1,5	Sykkel3	X	73	3,443461282	0,90310062	55,93053658
Sommerveita 3	1,5	Sykkel3	X	88	6,845994877	1,74220892	75,06111538
KONGENS G 19	1,5	Sykkel3	X	110	7,897130357	2,018410388	95,23672012
Gryta 2a	2,5	Sykkel4	X	2	3,686753046	0,951660213	3,686753046
fjordgata 24	1,5	Sykkel4	X	25	4,603318712	1,184265105	17,52093776
Dronningensgt. 14	1,5	Sykkel4	X	72	6,211960431	1,589148631	39,22697658
DRONNINGENS GATE 5	1,5	Sykkel4	X	99	6,083921775	1,55345348	53,85531422
Fjordgata 31	1,5	Sykkel4	X	120	5,314423179	1,380179705	66,11364071
gjennomsnitt					5,078163313	1,33254544	40,08758282
sum					111,7195929	28,73178232	914,4631205

Vedlegg 5: Resultater scenario 1-5

Tabellene i vedlegget viser inputdata og resultater fra de fem scenariene for hver av dagene simuleringen er utført.

Inputverdiene samt karakteristikker for hvert scenario i tabellen er som følger:

- Kjøretøy, hvilken type kjøretøy scenariet benytter.
- Kjøretøy, antallet kjøretøy som benyttes per dag i scenariet.
- Dato, dato for leveransene utført fra Posten AS i januar 2020.
- Servicetid (ST) start og slutt depot og rutefornyelser, som er satt til 10 minutter for hvert enkelt av disse handlingene.
- Kapasitet, i liter og kg for hvert enkelt kjøretøy i scenariet.
- Maks total tid, i minutter per kjøretøy.
- Ordre, inkluderer både ordre behandlet teoretisk og ordre i ArcMap, og er det reelle antall ordre som er overført til ArcMap av leveransene Posten har utført.
- Ordre behandlet teoretisk, ordre som er utenfor restriksjonene som er satt for lastesykkel, hvor det er en begrensning på størrelse og vekt per kolli på 100 liter og 23 kg. Disse er fjernet fra simuleringene med lastesykkel, og er tiltenkt å leveres med en varebil som ikke er inkludert i simuleringene.
- Ordre i ArcMap, antall ordre som er lagt inn i VRP verktøyet i ArcMap i simuleringene.

Resultatene som er presentert er som følger:

- Ordre behandlet i ArcMap, antallet leveranser som er utført i simuleringen
- Ordre ubehandlet i ArcMap, antallet leveranser som ikke er utført i simuleringen.
- Turer (start + rutefornyelser), turer representerer hvor mange ganger et lastet kjøretøy forlater depot, og inkluderer start depot for hvert kjøretøy og alle rutefornyelser. Av turer representerer start en start per kjøretøy.
- Av turer: rutefornyelser, antall rutefornyelser av turer.
- Stopp depot, antall stopp ved depot, en stopp per kjøretøy
- ST ordre, servicetiden i minutt som er benyttet totalt for å utføre leveransene, verdiene for hver enkelt stopp er beskrevet i delkapittel Scenarier Scenarier.
- Reisetid, tid i minutt hvor kjøretøyet er i bevegelse. Kan anses som tiden hvor det er effektiv forflytning mellom ulike lokasjoner.
- ST start og slutt depot og rutefornyelser, servicetid i minutt som er brukt ved nevnte handlinger.
- Total tid, i minutter. Summen av ST ordre, reisetid og ST rutefornyelser, start og slutt depot.
- Reiselengde/ reiselengde totalt, i kilometer.
- Reiselengde i snitt per tur, i kilometer.

- Volum/ totalt volum, i liter av ordre som er behandlet
- Vekt/ totalt vekt, i kg av ordre som er behandlet
- Tid snitt per kjøretøy, i minutter. Gjennomsnittlig tid benyttet for hvert kjøretøy for den enkelte dag.
- Volum, snitt per tur, i kg.
- Vekt, snitt per tur, i liter.

* Ordre ubehandlet i ArcMap for scenario 5: antallet leveranser som ikke er utført i simuleringen. Ordre er ubehandlet av to årsaker, 1: maksimal total tid er benyttet og de resterende leveransene overskrider denne tidsbruken. 2: Ordre utenfor rekkevidde («not travarsebel»), dette har kun påvirket ordre i scenario 5. Resultatene for ordre ubehandlet for scenario 5 er derfor presentert med tre verdier for ubehandlede ordre, xx (xx)(xx), disse representerer «ordre ubehandlet totalt» («not travarsebel») («ikke tid til»), ordre ubehandlet er den totale summen, som fordeles inn i de to andre kategoriene. Dette resultatet må tolkes individuelt for hver dag, er alle ordre ubehandlet «not travarsebel» kan dette bety at disse ordrene teoretisk kan bli levert i løpet av avsatt tid, men VRP verktøyet er begrenset til å ikke kunne gjøre dette. Er flere ordre i kategorien «ikke tid til» vil det gjerne bety at ordre som er satt som «not travarsebel» også kan bli utelatt på grunn av tidsbegrensning.

Scenario 1

Scenario		s1	s1	s1	s1	s1
Kjøretøy	type	varebil	varebil	varebil	varebil	varebil
Kjøretøy	antall	4	4	4	4	4
Dato		8. jan.	10. jan.	17. jan.	22. jan.	30. jan.
ST start og slutt depot og rutefornyelser	min	10	10	10	10	10
Kapasitet	liter, kg	7,7 1000	7,7 1000	7,7 1000	7,7 1000	7,7 1000
Maks total tid	min	360	360	360	360	360
Ordre totalt	antall	506	651	586	698	542
Ordre behandlet teoretisk	antall	0	0	0	0	0
Ordre i ArcMap	antall	506	651	586	698	542
Ordre behandlet i ArcMap	antall	506	626	586	640	542
Ordre ubehandlet i ArcMap	antall	0	25	0	58	0
Turer: start+ rutefornyelse	antall	4	6	4	4	4
Av turer: rutefornyelser	antall	0	2	0	0	0
Stopp depot	antall	4	4	4	4	4
Ordre i snitt per tur	antall	126,50	104,33	146,50	160,00	135,50
ST ordre	min	1065	1284	1232	1311	1141
Reisetid	min	50,8	55,3	55,2	46,8	53,2
ST start og slutt depot og rutefornyelser	min	80	100	80	80	80
Total tid	min	1195,8	1439,3	1367,2	1437,8	1274,2
Tid snitt per kjøretøy	min	299,0	359,8	341,8	359,4	318,5
Reiselengde totalt	km	30,7	34,5	33,0	28,3	31,9
Reiselengde i snitt per tur	km	7,68	5,75	8,26	7,09	7,96
Totalt volum	liter	16,14	24,67	20,65	25,08	18,94
Volum, snitt per tur	liter	4,04	4,11	5,16	6,27	4,74
Total vekt	kg	2893,01	4101,61	3232,22	3673,02	2699,32
Vekt, snitt per tur	kg	723,25	683,60	808,05	918,26	674,83

Scenario 2

Scenario		s2	s2	s2	s2	s2
Kjøretøy	type	lastesykk el 1 skap	lastesykkel 1 skap	lastesykkel 1 skap	lastesykk el 1 skap	lastesykk el 1 skap
Kjøretøy	antall	4 (+ 1)	4 (+ 1)	4 (+ 1)	4 (+ 1)	4 (+ 1)
Dato		8. jan.	10. jan.	17. jan.	22. jan.	30. jan.
ST start og slutt depot og rutefornyelser	min	10	10	10	10	10
Kapasitet	liter, kg	0,8 150	0,8 150	0,8 150	0,8 150	0,8 150
Maks total tid	min	360	360	360	360	360
Ordre totalt	antall	506	651	586	698	542
Ordre behandlet teoretisk	antall	30	59	45	43	35
Ordre i ArcMap	antall	476	592	541	655	507
Ordre behandlet i ArcMap	antall	476	553	541	544	507
Ordre ubehandlet i ArcMap	antall	0	39	0	111	0
Turer: start+ rutefornyelse	antall	19	21	20	23	18
Av turer: rutefornyelser	antall	15	17	16	19	14
Stopp depot	antall	4	4	4	4	4
Ordre i snitt per tur	antall	25,05	26,33	27,05	23,65	28,17
ST ordre	min	764	855,5	868,5	833	812,5
Reisetid	min	292,2	331,6	312,8	335,1	312,0
ST start og slutt depot og rutefornyelser	min	230	250	240	270	220
Total tid	min	1286,2	1437,1	1421,3	1438,1	1344,5
Tid snitt per kjøretøy	min	321,5	359,3	355,3	359,5	336,1
Reiselengde totalt	km	75,6	85,7	81,1	86,8	80,0
Reiselengde i snitt per tur	km	3,98	4,08	4,05	3,78	4,45
Totalt volum	liter	12,67	16,09	15,04	16,72	13,45
Volum, snitt per tur	liter	0,67	0,77	0,75	0,73	0,75
Total vekt	kg	2418,11	2802,56	2573,11	2752,27	2128,35
Vekt, snitt per tur	kg	127,27	133,46	128,66	119,66	118,24

Scenario 3

Scenario		s3	s3	s3	s3	s3
Kjøretøy	type	lastesykk el 2 skap	lastesykkel 2 skap	lastesykkel 2 skap	lastesykk el 2 skap	lastesykk el 2 skap
Kjøretøy	antall	4 (+ 1)	4 (+ 1)	4 (+ 1)	4 (+ 1)	4 (+ 1)
Dato		8. jan.	10. jan.	17. jan.	22. jan.	30. jan.
ST start og slutt depot og rutefornyelser	min	10	10	10	10	10
Kapasitet	liter, kg	1,6 300	1,6 300	1,6 300	1,6 300	1,6 300
Maks total tid	min	360	360	360	360	360
Ordre totalt	antall	506	651	586	698	542
Ordre behandlet teoretisk	antall	30	59	45	43	35
Ordre i ArcMap	antall	476	592	541	655	507
Ordre behandlet i ArcMap	antall	476	592	541	597	507
Ordre ubehandlet i ArcMap	antall	0	0	0	58	0
Turer: start+ rutefornyelse	antall	11	12	11	14	11
Av turer: rutefornyelser	antall	7	8	7	10	7
Stopp depot	antall	4	4	4	4	4
Ordre i snitt per tur	antall	43,27	49,33	49,18	42,64	46,09
ST ordre	min	764	933	868,5	944,5	812,5
Reisetid	min	254,2	307,6	270,4	312,1	299,0
ST start og slutt depot og rutefornyelser	min	150	160	150	180	150
Total tid	min	1168,2	1400,6	1288,9	1436,6	1261,5
Tid snitt per kjøretøy	min	292,1	350,1	322,2	359,1	315,4
Reiselengde totalt	km	46,3	55,6	49,4	57,1	54,5
Reiselengde i snitt per tur	km	4,21	4,64	4,49	4,08	4,95
Totalt volum	liter	12,67	18,24	15,04	18,93	13,45
Volum, snitt per tur	liter	1,15	1,52	1,37	1,35	1,22
Total vekt	kg	2418,11	3176,87	2573,11	3084,67	2128,35
Vekt, snitt per tur	kg	219,83	264,74	233,92	220,33	193,49

Scenario 4

Scenario		s4	s4	s4	s4	s4
Kjøretøy	type	varebil	varebil	varebil	varebil	varebil
Kjøretøy	antall	4	4	4	4	4
Dato		8. jan.	10. jan.	17. jan.	22. jan.	30. jan.
ST start og slutt depot og rutefornyelser	min	10	10	10	10	10
Kapasitet	liter, kg	7,7 1000	7,7 1000	7,7 1000	7,7 1000	7,7 1000
Maks total tid	min	320+40	320+40	320+40	320+40	320+40
Ordre totalt	antall	506	651	586	698	542
Ordre behandlet teoretisk	antall	0	0	0	0	0
Ordre i ArcMap	antall	506	651	586	698	542
Ordre behandlet i ArcMap	antall	506	572	558	575	542
Ordre ubehandlet i ArcMap	antall	0	79	28	123	0
Turer: start+ rutefornyelse	antall	4	5	4	4	4
Av turer: rutefornyelser	antall	0	1	0	0	0
Stopp depot	antall	4	4	4	4	4
Ordre i snitt per tur	antall	126,50	114,40	139,50	143,75	135,50
ST ordre	min	1065	1144	1148	1160	1141
Reisetid	min	49,8	42,4	48,6	36,9	57,7
ST start og slutt depot og rutefornyelser	min	80	90	80	80	80
Total tid	min	1194,8+40	1276,4+40	1276,6+40	1276,9+40	1278,7+40
Tid snitt per kjøretøy	min	298,7	319,1	319,2	319,2	319,7
Reiselengde totalt	km	30,0	26,4	29,4	23,2	34,4
Reiselengde i snitt per tur	km	7,50	5,27	7,36	5,81	8,60
Totalt volum	liter	16,14	23,08	19,70	23,24	18,94
Volum, snitt per tur	liter	4,04	4,62	4,92	5,81	4,74
Total vekt	kg	2893,01	3839,50	3091,26	3349,82	2699,32
Vekt, snitt per tur	kg	723,25	767,90	772,82	837,45	674,83

Scenario 5

Scenario		s5	s5	s5	s5	s5
Kjøretøy	type	varebil	varebil	varebil	varebil	varebil
Kjøretøy	antall	4	4	4	4	4
Dato		8. jan.	10. jan.	17. jan.	22. jan.	30. jan.
ST start og slutt depot og rutefornyelser	min	10	10	10	10	10
Kapasitet	liter, kg	7,7 1000	7,7 1000	7,7 1000	7,7 1000	7,7 1000
Maks total tid	min	360	360	360	360	360
Ordre totalt	antall	506	651	586	698	542
Ordre behandlet teoretisk	antall	0	0	0	0	0
Ordre i ArcMap	antall	506	651	586	698	542
Ordre behandlet i ArcMap	antall	484	617	558	633	524
Ordre ubehandlet i ArcMap	antall	22 (22)(0)	34 (31)(3)	28 (28)(0)	65 (21)(44)	18 (18)(0)
Turer: start+ rutefornyelse	antall	4	6	4	5	4
Av turer: rutefornyelser	antall	0	2	0	1	0
Stopp depot	antall	4	4	4	4	4
Ordre i snitt per tur	antall	121,00	102,83	139,50	126,60	131,00
ST ordre	min	1017	1277	1173	1301	1100
Reisetid	min	50,7	60,7	54,6	45,8	55,5
ST start og slutt depot og rutefornyelser	min	80	100	80	90	80
Total tid	min	1147,7	1437,7	1307,6	1436,8	1235,5
Tid snitt per kjøretøy	min	286,9	359,4	326,9	359,2	308,9
Reiselengde totalt	km	30,3	36,7	32,5	28,2	32,8
Reiselengde i snitt per tur	km	7,58	6,12	8,13	5,64	8,19
Totalt volum	liter	15,27	24,00	19,39	24,91	18,36
Volum, snitt per tur	liter	3,82	4	4,85	4,98	4,59
Total vekt	kg	2752,91	4057,97	3081,91	3638,57	2606,67
Vekt, snitt per tur	kg	688,23	676,33	770,48	727,71	651,67

Vedlegg 6: Følgebrev masteroppgave 2020



Faculty of Engineering
Department of Civil and Environmental Engineering

Date
3 June 2020
Your date

Our reference
Your ref

1 of 1

To Whom it Might Concern

Master thesis spring 2020 - consequences of the Covid 19 pandemic

The pandemic situation in spring 2020 made it necessary to change or adjust the topic for master theses at NTNU. The university closed including laboratories and did not allow any type of field work, thus made it impossible to continue planned work for many students.

Sincerely yours

Inge Hoff
Professor



This letter was sent to all students with specialisation in Transport, Road or Railways in the Civil and Environmental study program to be included as an attachment in their thesis.

Address	Org. no. 974 767 880	Location	Phone	Executive officer
7491 Trondheim Norway	postmottak@iv.ntnu.no www.ntnu.no/ibm	Høgskoleringen 7 A	+47 73594640	Inge Hoff inge.hoff@ntnu Phone: 934 26 463

Please address all correspondence to the organizational unit and include your reference.

