



UHASSELT

KNOWLEDGE IN ACTION

Faculteit Bedrijfseconomische Wetenschappen

master handelsingenieur

Masterthesis

Het gebruik van drones voor last-mile deliveries

Olivier Joossens

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master handelsingenieur, afstudeerrichting operationeel management en logistiek

PROMOTOR :

dr. Ruben D'HAEN



UHASSELT

KNOWLEDGE IN ACTION

www.uhasselt.be
Universiteit Hasselt
Campus Hasselt:
Martelarenlaan 42 | 3500 Hasselt
Campus Diepenbeek:
Agoralaan Gebouw D | 3590 Diepenbeek

2024
2025



Faculteit Bedrijfseconomische Wetenschappen

master handelsingenieur

Masterthesis

Het gebruik van drones voor last-mile deliveries

Olivier Joossens

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master handelsingenieur, afstudeerrichting operationeel management en logistiek

PROMOTOR :

dr. Ruben D'HAEN

Woord vooraf

Deze masterproef vormt het sluitstuk van mijn opleiding Handelsingenieur aan de Universiteit Hasselt, met als afstudeerrichting 'Operationeel Management en Logistiek'. In dit onderzoek wordt de rol van drones in last mile delivery onderzocht. Het uitwerken van dit werk was zeer uitdagend, maar desalniettemin een leerrijk en boeiend proces. De geleverde resultaten zouden niet tot stand gekomen zijn zonder de steun en begeleiding van verschillende mensen, die ik graag in dit woord vooraf wil bedanken.

Ten eerste wil ik mijn promotor, dr. Ruben D'Haen, hartelijk bedanken voor zijn begeleiding, vlotte feedback en voortdurende steun gedurende de onderzoeksperiode. Zijn expertise en perspectief hebben een grote bijdrage geleverd aan de uiteindelijke masterproef.

Mijn dank gaat ook uit naar mijn ouders en mijn broer, voor de continue steun en optimisme. Hun vertrouwen en aanmoediging hebben mij de motivatie gegeven om door te zetten. Ten slotte wil ik mijn vriendin bedanken. Haar begrip en mentale steun hebben mij zeker geholpen om me volledig in te zetten.

Ik hoop dat de resultaten en inzichten die in deze masterproef worden gepresenteerd, u iets bijbrengen.

Olivier Joossens

Juni, 2025

Samenvatting

Inleiding

Er is een grote verandering in het bestelgedrag van consumenten. Volgens Vakulenko (2019) plaatsen consumenten vaker dan ooit een online bestelling, en dat in kleinere volumes, en verwachten dat hun pakketje de volgende dag of zelfs de dag zelf al arriveert. Hiernaast was er een aanzienlijke groei in de e-commerce sector van meer dan 7% in 2022 en 2023 (Lozzi et al., 2022). De Covid-19-pandemie heeft de vraag naar on-demand logistiek nog versterkt doordat mensen niet meer zelf naar de winkel durfden (Saenz et al., 2022). De groei zet een enorme druk op de supply chain van transportbedrijven op vlak van bezorgtijd en operationele kosten. Het heeft voornamelijk een impact op de laatste stap van de transportketen, ook wel de last mile genoemd (Zhu et al., 2023), waarbij het aantal leveringen in 2027 gegroeid zal zijn met 78% ten opzichte van 2022. Ongeveer 25% van de bedrijven heeft hierdoor moeite met de strakke tijdsbeperkingen van de verzoeken (Agarwal et al., 2002). Momenteel hebben verschillende transportbedrijven al te maken met een lagere voertuigbezetting en een groter aantal stops, wat resulteert in inefficiënte leveringen (Boyer et al., 2009). Dit leidt tot hoge kosten in last mile delivery (LMD) (Raghunatha, 2023).

De toename in leveringen en de bijbehorende inefficiënties hebben echter niet alleen economische gevolgen. Ook op ecologisch vlak vormt deze trend een uitdaging. De klimaatverandering vormt al enkele jaren een bedreiging voor onze planeet. Een belangrijke oorzaak van de klimaatverandering is de uitstoot van broeikasgassen, waarbij ongeveer 30% veroorzaakt wordt door de transportsector (Uherek, 2010). De klimaatdoelstellingen van de EU mikken op een daling van deze uitstoot. De transportbedrijven moeten dus zoeken naar een duurzame manier om hun goederen te vervoeren. Hiervoor zijn elektrische voertuigen een mogelijkheid om CO₂-uitstoot te verminderen (El Habti, 2024). Zij brengen voordelen met zich mee zoals een verminderde geluidsoverlast en lagere uitstoot, maar lossen het probleem van verkeerscongestie in stadslogistiek niet op. Het World Economic Forum schat dat de groeiende vraag naar e-commerce bezorgingen zal leiden tot 36% meer leveringsvoertuigen in de steden tegen 2030. Hierdoor zal de uitstoot van broeikasgassen stijgen met 32% en congestie met 21% (WEF, 2020).

Drones bieden een oplossing voor deze problematiek door congestie te verminderen en luchttransport in steden te introduceren (Rejeb et al., 2021). Ze kunnen zorgen voor een meer gestroomlijnde en voorspelbare planning voor transport via de weg. De snelheid en flexibiliteit van drones kan een grote meerwaarde bieden om in te spelen op de consumentenbehoefte in LMD (Goodchild & Toy, 2018). Hiernaast zijn ze een duurzamer en kostenbesparend alternatief (Gu, 2023). Volgens verschillende onderzoeken liggen de operationele kosten van drones ongeveer 20% lager dan die van traditionele bezorgmethodes. Door de coronapandemie staan consumenten meer open voor innovatieve bezorgmethodes, zoals droneleveringen (Mohsan, 2022).

Literatuurstudie

De integratie van drones in de transportsector botst echter op enkele obstakels. Zo is er een strenge wet- en regelgeving op het gebruik van drones in LMD om veiligheid te garanderen (EASA, 2024). Ook de publieke acceptatie van de maatschappij vormt een hindernis (Yoo, 2018) door de visuele belemmering en mogelijke schending van privacy (Khan et al., 2019). Hiernaast zijn er enkele uitdagingen voor drones in de transportsector zoals de batterijcapaciteit, data-uitwisselingssystemen en het optimaal routeren van de voertuigen (Kim et al., 2015).

De beperkte batterijcapaciteit van een drone zal natuurlijk invloed hebben op de manier waarop rittenplanningen worden opgesteld (Martin et al., 2024). Het optimalisatieprobleem omtrent het bepalen van de optimale route om verschillende eindbestemmingen te bezoeken, bij gebruik van zowel een vrachtwagen als een drone, wordt het vehicle routing problem with drones (VRPD) genoemd (Murray, 2015). Hierbij wordt rekening gehouden met extra beperkingen zoals batterijcapaciteit, capaciteitsbeperkingen en de synchronisatiebeperkingen tussen de drone en de vrachtwagen.

Door een literatuurstudie worden de verschillende voordelen en nadelen van drones toegelicht. Ook de barrières tot implementatie in de maatschappij en de toekomstige uitdagingen en opportuniteiten van drones worden beschreven. Hierna worden de verschillende varianten van het VRPD toegelicht met hun specifieke doelfuncties en beperkingen. Ook worden er verschillende oplossingsmethoden kort toegelicht. Ten slotte wordt ook een vergelijkingsanalyse gemaakt tussen de operationele kosten van traditionele bezorgmethoden en die van drones met één of meerdere bezoeken per trip.

Dit deel van de masterproef beantwoordt drie deelvragen met betrekking tot drones in LMD:

- Is het gebruik van drones in LMD realistisch en voordelig voor de toekomst?
- In welke context is het VRPD relevant en kan het voor een bijdrage zorgen aan de huidige logistieke uitdagingen?
- Wat zijn de uitdagingen die overbrugd moeten worden om een goede werking van drones in LMD te garanderen?

Empirisch deel

In het empirisch deel wordt een optimalisatiemodel opgesteld in de vorm van een mixed integer linear programming problem. Dit model werd opgesteld met behulp van LINGO-software. Het VRPD-model laat een vrachtwagen samenwerken met een drone, waarbij de vrachtwagen naar parkeerlocaties rijdt om de drone uit te sturen. De drone bedient de klanten in trips vanuit de parkeerlocaties van de vrachtwagen. Per trip kan de drone maximaal drie klanten bedienen. Hiernaast wordt er een restrictie geplaatst op de batterijcapaciteit van de drone, wat leidt tot verschillende routes bij een verschillende batterijcapaciteit. Het optimalisatiemodel minimaliseert de makespan door de optimale route van vrachtwagen en drone te kiezen. Dit omvat de totale reistijd en de duur van onderhoud aan de vrachtwagen of drone. Zo wordt er een batterijwissel gebruikt per trip, waarvan de duur geïntegreerd wordt in de reistijd van de drone.

Er wordt onderzocht wat het effect is van een hogere batterijcapaciteit op de makespan en de routestructuur die gebruikt wordt door de vrachtwagen en drone. Dit wordt getest aan de hand van 81 verschillende opstellingen waarbij bepaalde operationele parameters verschillen. Er wordt onderzocht hoe deze parameters de oplossing beïnvloeden. Het model werkt theoretisch gezien voor elk aantal klanten maar is in praktijk beperkt door de lange runtime van het model in LINGO.

Conclusie

Op basis van het verrichte onderzoek in de literatuurstudie en het empirisch deel wordt een antwoord geformuleerd op de onderzoeksvraag en de verschillende deelvragen. De studie toont dat een hogere batterijcapaciteit leidt tot grotere trips met meer klanten per trip, en een lager aantal trips. Dit zorgt ervoor dat de totale reistijd lager is dan bij het gebruik van een lage batterijcapaciteit. Wanneer de drone minder lang kan vliegen, worden er dus meer trips gemaakt om hetzelfde aantal klanten te bedienen. Een veranderende dronesnelheid heeft een gelijkaardig effect: een snellere drone zal vaak meer klanten per trip kunnen bedienen dan bij een lage snelheid aangezien de batterijcapaciteit gemeten wordt in tijd. Dit resulteert in een kortere makespan. Hiernaast ligt er een groot potentieel op vlak van tijdswinst en kostenbesparing wanneer er meerdere klanten in één dronevlucht bezocht kunnen worden.

Toekomstig onderzoek kan dit model testen bij het gebruik van meer klanten en verschillende locaties. Het model kan ook uitgebreid worden zodat er meer dan drie klanten per trip toegelaten worden. Verder kan het model realistischer worden opgesteld, bijvoorbeeld door rekening te houden met capaciteitsbeperkingen, no fly-zones en strengere tijdsvensters. Hiernaast kunnen er optimalisatiealgoritmes, zoals metaheuristieken, gebruikt worden om de zoektijd naar een oplossing te verlagen. Deze krachtige en flexibele zoekmethodes kunnen een extra efficiëntie en toepasbaarheid toevoegen bij het oplossen van moeilijk oplosbare optimalisatieproblemen.

Inhoudsopgave

Samenvatting	2
1.1 Introductie	9
1.2 Onderzoeksvragen	13
1.2.1. Centrale onderzoeksvraag	13
1.2.2. Deelvragen	13
1.3 Onderzoeksmethodologie	15
1.3.1 Literatuurstudie VRP(D)	15
1.3.2 Praktijkgedeelte.....	15
2. Literatuurstudie	16
2.1 De groei van e-commerce	16
2.2 De opkomst van drones binnen de supply chain	17
2.3 Drones in last-mile delivery	19
2.3.1 Nieuwe trends in LMD.....	20
2.3.2 Uitdagingen van drones in LMD.....	22
2.3.3 Wetgeving, regelgeving en ethiek	25
2.3.4 Oplossingen om uitdagingen te overbruggen	26
2.4 VRP modellen	29
2.4.1 Inleiding VRP.....	29
2.4.2 VRP-varianten	30
2.5 VRPD.....	33
2.5.1 Introductie	33
2.5.2 VRPD-structuren	33
2.5.3 Evolutie en uitbreidingen van het VRPD	38
2.5.4 Modelleren van een VRPD	43
2.5.5 Oplossingsmethoden	48
2.6 Een vergelijkingsanalyse van de operationele kosten	50
2.7 Batterijcapaciteit binnen VRPD.....	53
2.7.1 Inleiding	53
2.7.2 De rol van de batterijcapaciteit van drones in LMD	54
2.7.3 Beperkingen op batterijcapaciteit	56
3. Praktijkgedeelte	59

3.1 Inleiding tot VRPD-model	59
3.2 VRPD-model	64
3.2.1 Assumpties	64
3.2.2 Wiskundige notatie.....	65
4. Resultaten empirisch deel	73
5. Conclusie	82
Bibliografie.....	84
Appendix	91

Lijst van figuren

Figuur 1: Aantal publicaties over routing, batterijmanagement etc (Eskandaripour et al., 2023) .	21
Figure 2: Internet of Drones (Gharibi et al., 2016)	24
Figuur 3: Batterijwissel en contactloos laden (Ahmad et al., 2020).....	27
Figuur 4: PDR (Nguyen et al., 2019)	34
Figuur 5: PDR (Saleu et al., 2022)	35
Figuur 6: FSTSP (Murray et al., 2015)	36
Figuur 7: Structuur Dolgui et al. (2021).....	36
Figuur 8: D-TDRP-SDOP (Gu, 2023)	37
Figuur 9: 2EVRPD (Breunig., 2019)	41
Figuur 10: Locaties knooppunten VRPD-model.....	60
Figuur 11: Route voor $B=0.3$, $V_t=20$, $V_d=50$, $Maxp=3$	75
Figuur 12: Route voor $B=0.4$, $V_t=20$, $V_d=50$, $Maxp=3$	75
Figuur 13: Route voor $B=0.5$, $V_t=20$, $V_d=50$, $Maxp=3$	76
Figuur 14: Route voor $B=0.5$, $V_t=30$, $V_d=60$, $Maxp=1$	80
Figuur 15: Route voor $B=0.5$, $V_t=30$, $V_d=60$, $Maxp=2$	81
Figuur 16: Route voor $B=0.5$, $V_t=30$, $V_d=60$, $Maxp=3$	81

Lijst van tabellen

Tabel 1: Overzicht VRP-varianten.....	32
Tabel 2: VRPD vs FSTSP	38
Tabel 3: Beperkingen en doelfunctie van onderzoeken	46
Tabel 4: Operationele kostenverschillen Traditioneel vs SV & MV (Zhang, 2023)	51
Tabel 5: Overzicht kostenbesparing drones vs traditioneel	52
Tabel 6: Coördinaten knooppunten VRPD-model	60
Tabel 7: Opstelling bestaande VRPD-modellen	62
Tabel 8: Overzicht parameterwaarden voor 81 opstellingen.....	63
Tabel 9: Overzicht makespan 81 opstellingen	73
Tabel 10: Gemiddelde makespan per batterijcapaciteit	74
Tabel 11: Structuur van de route (gemiddelden).....	74
Tabel 12: Overzicht tijdsverdeling drone-truck.....	77
Tabel 13: Overzicht afstandsverdeling drone-truck.....	77
Tabel 14: Makespan & routestructuur per batterijcapaciteit en aantal parcels	78
Tabel 15: Tijdsverdeling per batterijcapaciteit en aantal parcels.....	79
Tabel 16: Afstandsverdeling per batterijcapaciteit en aantal parcels	79

1. Het gebruik van drones voor last mile delivery

1.1 Introductie

De snelle groei van de e-commerce sector heeft de verwachtingen van consumenten aanzienlijk veranderd (Narayana et al., 2013). Met name als het gaat om het versnellen van levertijden, het verminderen van kosten (Joerss et al., 2016) en het vergroten van het gemak. Waar levering binnen enkele dagen vroeger als zeer snel werd beschouwd, is dit nu voor veel consumenten niet meer voldoende (Xie, 2024). Snelle en goedkope leveringen, vaak binnen dezelfde dag of zelfs binnen enkele uren, zijn steeds vaker een belangrijke factor voor de klanttevredenheid (Vakulenko, 2019). Dit legt een enorme druk op de laatste schakel van de supply chain: de last-mile delivery (Zhu et al., 2023)

De analisten van het World Economic Forum schatten dat de groeiende vraag naar e-commerce bezorging zal leiden tot 36% meer leveringsvoertuigen in de steden tegen 2030. Hierdoor zal de uitstoot van broeikasgassen stijgen met 32% en congestie met 21% (WEF, 2020). Hiernaast zal het aantal leveringen in de last mile delivery groeien met 78% (PTV Logistics, 2025). Dit komt door de toename in kleinere leveringen en aantal eindbestemmingen (Stanley, 2024).

De groei in last mile delivery (LMD) vergroot het comfort voor de consument maar brengt ook uitdagingen mee voor stedelijke gebieden zoals een toenemende drukte en verkeersproblemen. Dit is de laatste stap van de supply chain, waarbij goederen getransporteerd worden van een lokaal distributiecentrum naar de eindbestemming: een winkel of de finale klant zijn thuis. Dit deel van de transportketen bevat 60% tot 75% van de totale logistieke activiteiten, en dus een relatief grote hoeveelheid kosten (Joerss et al., 2016). Daarnaast ervaren transportbedrijven een groter aantal stops, een lagere voertuigbezetting en inefficiënte leveringen door menselijke handelingen en fouten (Boyer et al., 2009). De combinatie van deze aspecten zal leiden tot nog hogere kosten voor dit laatste onderdeel van de leveringsketen (Raghunatha, 2023).

De nood aan optimalisatie van de logistiek in steden wordt dus steeds urgenter door die groeiende verkeerscongestie, hogere uitstoot en toenemende eisen van consumenten. Transport in stedelijke gebieden is verantwoordelijk voor een aanzienlijk deel van de luchtvervuiling en geluidsoverlast, wat niet alleen de volksgezondheid bedreigt, maar ook de klimaatdoelstellingen onder druk zet (Taniguchi, 2016). Daarnaast zorgt de explosieve groei van e-commerce voor een enorme toename in pakketleveringen, waardoor de druk op stedelijke infrastructuur verder toeneemt. Klanten verwachten snelle, goedkope en duurzame leveringen, wat de logistieke bedrijven dwingt tot efficiëntere processen en innovatieve oplossingen zoals het gebruik van elektrische voertuigen, micro-hubs en geoptimaliseerde routeplanningen (Toillier, 2016). Zonder structurele optimalisatie blijven de negatieve externe effecten van stadslogistiek toenemen, wat zowel economische als sociale gevolgen zal hebben.

De inzet van drones kan een innovatieve oplossing bieden om aan deze eisen te voldoen (Jazairy et al., 2022). Drones, ook wel unmanned aerial vehicles (UAV's) genoemd, worden al veel gebruikt in de militaire sector en de zorgsector. Het bedrijf Zipline bijvoorbeeld, levert medische producten zoals bloed en vaccins via autonome drones in landen met beperkte infrastructuur, zoals Rwanda en Ghana, en heeft daarbij al honderdduizenden leveringen uitgevoerd (Mbabazi, 2017). Hiernaast spelen UAV's een cruciale rol bij natuurrampen door snel toegang te bieden tot moeilijk bereikbare gebieden, medische goederen te leveren en schade snel in kaart te brengen voor efficiëntere hulpverlening (Mahadevan, 2007). Drones worden ook al gebruikt voor voorraadbeheer in sommige magazijnen (Nelis, 2024). Voor last mile deliveries wordt de nieuwe technologie nog niet gebruikt. Dit komt door enkele hindernissen die moeilijk te overbruggen zijn.

In landen zoals Canada, China, Japan en de Verenigde Staten van Amerika zien we wel al dat een handvol bedrijven te werk gaan met drones (Custers et al., 2015). Vooral Google neemt hier de leiding in met dochterbedrijf Wing door praktijktesten in te voeren. Ook in Europa heeft het eerste bedrijf, ADLC, toestemming gekregen om gebruik te maken van drone-transport (ADLC, 2024). Er zijn verschillende sectoren die het gebruik van drones al volledig hebben geïmplementeerd in hun werkomgeving: het leger, de bouw, de zorg, landbouw en journalistiek. In deze masterproef zoomen we in op het gebruik van de unmanned aerial vehicles in een logistieke context, meer bepaald in het laatste deel van de supply chain: de last mile delivery.

Door de stijgende vraag naar snellere leveringen voor de klant, is er een toenemende behoefte aan optimalisatie binnen de logistieke keten (Agarwal et al., 2002). Ongeveer 25% van de bedrijven heeft moeite met de strakke tijdsbeperkingen van de verzoeken. Dit heeft betrekking op ophaal- en leveringsprocessen. Voor delivery is 27% van de klanten niet tevreden met de lage kwaliteit van leveringsdiensten. Traditionele last-mile delivery-methoden, zoals bestelwagens, botsen op grenzen qua efficiëntie in dichtbevolkte stedelijke gebieden (Zhang, 2016). Verkeersopstoppen en beperkte parkeermogelijkheden vertragen leveringen en verhogen operationele kosten (Jayasooriya et al., 2017). Dit probleem in stadslogistiek wordt verergerd door de toenemende wereldbevolking en de urbanisatie (Zhang, 2016). Drones kunnen een uitweg bieden door congestie te omzeilen en pakketten rechtstreeks naar klanten te bezorgen (Jazairy et al., 2014), wat niet alleen sneller, maar ook kosteneffectiever kan zijn (Di Puglia Pugliese et al., 2019).

Daarnaast spelen milieukwesties een steeds prominentere rol (McKinnon, 2024). De transportsector is een van de grootste bijdragers aan CO₂-uitstoot, en traditionele last-mile leveringsmethoden verergeren dit probleem (Uherek, 2010). Drones, aangedreven door elektrische energie, hebben het potentieel om leveringen duurzamer te maken door de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen te verminderen (Jazairy et al., 2024). Dit sluit niet alleen aan bij de klimaatdoelstellingen, maar ook bij de groeiende vraag van burgers naar groenere oplossingen in logistiek en dus het verbeteren van de klanttevredenheid (Customer expectations of E-commerce, 2013). Toch blijkt de publieke opinie over drones nog niet zo positief.

De COVID-19-pandemie heeft de acceptatie van drones in de logistieke sector aanzienlijk versneld (Saenz et al., 2022). Onderzoek wijst uit dat consumenten sinds het begin van de pandemie meer

openstaan voor innovatieve bezorgmethoden, zoals drones, om het risico op virusoverdracht te beperken (Kim et al., 2021). Efficiëntie, snelheid en contactloos leveren werden tijdens deze crisis gezien als belangrijke voordelen, vooral in stedelijke gebieden (Saenz et al., 2022). Bedrijven hebben hierop ingespeeld door te investeren in dronebezorgdiensten om te voldoen aan de vraag naar veilige en snelle leveringen. PricewaterhouseCoopers UK (Cameron, 2018) voorspelt dat het luchtruim boven Groot-Brittannië tegen 2030 drastisch zal veranderen. Volgens hen zullen er drones door het luchtruim vliegen en commerciële leveringen voltooien over heel het land.

Toch blijven er uitdagingen rond privacy, veiligheid en regelgeving die opgelegd worden door de Federal Aviation Administration (FAA) in de VS, de European Union Aviation Safety Agency (EASA) in de EU. Consumenten maken zich zorgen over gegevensbescherming en de risico's van drones in drukke stedelijke omgevingen (Khan et al., 2019). Om de acceptatie verder te vergroten, is het van cruciaal belang dat beleidsmakers en bedrijven duidelijke regelgeving ontwikkelen en technologieën, zoals een veiligheidssysteem, implementeren die deze zorgen adresseren (Saenz et al., 2022)

De studie van Yoo (2018) toont aan dat de acceptatie van droneleveringen sterk afhankelijk is van verschillende factoren, zoals de voordelen van drones (zoals snelheid en milieuvriendelijkheid), de gebruiksvriendelijkheid, de waargenomen risico's (zoals prestatie- en privacyrisico's), en de persoonlijke innovativiteit van consumenten. Een ander probleem is het visueel vervuilen van de lucht. De publieke opinie is dat drones het uitzicht vervuilen en een vervelend geluid maken. Zeker wanneer het aantal drones groot is, zal dit in boze aard vallen bij de burger.

Ondanks deze bezwaren kunnen drones zorgen voor een meer gestroomlijnde en voorspelbare planning voor transport via de weg door het gebruik van vrachtwagens en bestelbussen te verminderen. Langs de andere kant zorgt dit wel voor een andere complexiteit, namelijk de additionele verkeersplanning voor luchttransport (Wild et al., 2016). Automatisering door middel van droneleveringen kan bedrijven helpen arbeidskosten te verlagen en tegelijkertijd de snelheid van operaties te verhogen (Zhu et al., 2023). Voor bedrijven die actief zijn in een competitieve markt, kan deze efficiëntie een doorslaggevende factor zijn voor het succes op de lange termijn (Kalaitzi et al., 2019).

Naast het overbruggen van de problemen rond de publieke acceptatie en regelgeving moeten er dus nog operationele hordes overwonnen worden. Hier speelt routing een cruciale rol in de toepassing van drones voor last-mile delivery, vooral in stedelijke gebieden waar complexiteit en congestie uitdagingen vormen (Kim et al., 2015). Het bepalen van efficiënte routes vereist het rekening houden met factoren zoals luchtruimbeperingen, no-fly zones, dichtheid van gebouwen en veranderende weersomstandigheden, enzovoort (Jazairy et al., 2023). In stedelijke gebieden kan een suboptimale routeplanning leiden tot vertragingen, verhoogde operationele kosten en inefficiënt gebruik van dronecapaciteit. Door gebruik te maken van geavanceerde routing-algoritmen en real-time gegevens, kunnen bedrijven de effectiviteit van droneleveringen aanzienlijk verbeteren en tegelijkertijd voldoen aan stedelijke regelgeving en milieueisen (Kim et al., 2015). Het meest gebruikte hulpmiddel om het routeren van voertuigen aan te pakken en te optimaliseren is het Vehicle Routing Problem (VRP).

Een VRP-model werkt als volgt: Het doel van het model is om de meest efficiënte route te vinden voor een vloot voertuigen die verschillende klanten moeten bedienen. Dit kan de snelste route zijn maar ook de goedkoopste, afhankelijk van het doel van het model. In het model bevinden de klanten zich op verschillende locaties en elk voertuig heeft beperkingen, zoals de capaciteit van de lading die het kan vervoeren en het aantal klanten dat het kan bedienen. Het probleem begint met een set gegevens: de locaties van de klanten, het depot (de start- en eindlocatie van de voertuigen), en een matrix die de afstanden of reistijden tussen de verschillende locaties weergeeft. Daarnaast kunnen er specifieke voorwaarden zijn, zoals de hoeveelheid lading die elke klant moet ontvangen of tijdvensters waarin een klant bediend moet worden. Deze voorwaarden worden beperkingen genoemd. Het idee is om de waarde van de doelfunctie te optimaliseren door een route te plannen die begint en eindigt bij het depot, waarbij alle klanten precies één keer bezocht worden en alle beperkingen worden gerespecteerd.

Een specifiek type routingmodel in dit kader, is het Vehicle Routing Problem met Drones (VRPD). Dit model richt zich op het optimaliseren van routes in een hybride systeem waarin drones samenwerken met traditionele voertuigen (Wang et al., 2019). In een VRPD-scenario kunnen voertuigen dienen als mobiele hubs, van waaruit drones pakketten afleveren naar bestemmingen die moeilijk of tijdrovend zijn om over de weg te bereiken (Wang & Sheu, 2019). Dit model maakt niet alleen een efficiënter gebruik van middelen mogelijk, maar helpt ook om de kosten te verlagen, de levertijd te verkorten en de belasting op stedelijke infrastructuur te verminderen. Het toepassen van VRPD-modellen biedt een innovatieve manier om de dynamiek van last-mile delivery in stedelijke gebieden verder te transformeren (Murray et al., 2015). De complexiteit van een VRPD is vaak groter dan die van een VRP door de extra synchronisatie tussen drone en vrachtwagen.

Deze masterproef bespreekt de voordelen die drones met zich mee kunnen brengen, evenals de uitdagingen die ze moeten overbruggen om een succesverhaal te worden. Hierbij wordt er gefocust op het gebruik van UAV's in een LMD-context. De nieuwe technologie is veelbelovend, maar het is onzeker of de maatschappij de implementatie ervan snel zal accepteren. Naast deze aspecten, wordt er ook een VRPD-model opgesteld in het empirisch deel met behulp van LINGO-software. Aan de hand van dit model wordt een onderzoek gedaan naar de rol van batterijcapaciteit bij het routeren van een vrachtwagen en drone door de stad. De invloed van een veranderende batterijcapaciteit, dronesnelheid, aantal klanten per dronevlucht op de totale reisduur, aantal vrachtwagenstops, aantal dronevluchten en het gebruik van de drone wordt onderzocht.

1.2 Onderzoeksvragen

Wat volgt is een toelichting van de centrale onderzoeksvraag waarop deze thesis verder zal bouwen. Naast de centrale onderzoeksvraag worden er deelvragen opgesteld die betrekking hebben op het gebruik van drones in last mile delivery. Deze masterproef tracht een antwoord te formuleren op deze vragen met behulp van een literatuurstudie als kwalitatief onderzoek en met behulp van een empirisch deel als kwantitatief onderzoek.

1.2.1. Centrale onderzoeksvraag

Deze masterproef tracht een antwoord te geven op de centrale onderzoeksvraag:

“Hoe beïnvloedt een verbetering in batterijcapaciteit van drones de leveringen die gemaakt worden in context de van last-mile delivery?”

Binnen het VRPD is er een ruim aanbod aan varianten aanwezig in de literatuur. Deze masterproef focust op een aspect wat vaak gebruikt wordt in VRPD-modellen, de batterijcapaciteit. Studies gebruiken verschillende manieren om de batterijcapaciteit toe te voegen aan hun model maar schrijven niet over de invloed op de totale reistijd, de structuur van de route en het gebruik van het leveringsvoertuig.

VRP met drones zijn al onderzocht in het domein van het VRP en in veel studies wordt er gebruik gemaakt van een veranderende batterijcapaciteit of het bereik van de UAV. Dit zal dus als startpunt dienen binnen de literatuurstudie en voor het uiteindelijk praktijkonderzoek. In het empirisch deel wordt er een VRPD-model opgesteld in de vorm van een lineair programmeringsmodel met behulp van LINGO-software. Er worden 81 verschillende opstellingen met veranderde parameters, zoals de batterijcapaciteit, onderzocht. Het doel van het VRPD-model is de minimalisatie van de totale reistijd, inclusief batterijwissels. In dit model willen we zo veel mogelijk realistische factoren implementeren zoals stationaire parkeerplaatsen voor de vrachtwagen, een batterijwissel, een tijdsvenster voor de totale reistijd en een optimale klantenvolgorde in de trips van de drone, om te garanderen dat het model praktisch relevant is.

Dit is een uniek onderwerp. In de literatuur wordt er zelden direct onderzoek gedaan naar het effect van de batterijcapaciteit van de drone op de trips die de UAV maakt en hoeveel klanten er per trip bezocht worden. De constante verbetering in batterijtechnologie maakt dit onderwerp zeer aantrekkelijk en realistisch om te bestuderen. Elke verbetering in batterijduur kan een veelbelovende meerwaarde vormen voor het gebruik van UAV's in een LMD-context.

1.2.2. Deelvragen

In deze sectie worden enkele deelvragen geformuleerd die betrekking hebben op het gebruik van drones in last-mile delivery. Om deze vragen te beantwoorden wordt een grote hoeveelheid

informatie gehaald uit een literatuurstudie naar verschillende aspecten van dronegebruik:

- **Is het gebruik van drones in LMD realistisch en voordelig voor de toekomst?**

Deze vraag zal beantwoord worden aan de hand van de informatie die gevonden werd over dronegebruik. De nieuwe technologie heeft voordelen maar brengt ook complicaties en onrust met zich mee. Er zal een afweging gemaakt worden over de haalbaarheid van de implementatie en de barrières die overbrugd moeten worden, om vervolgens tot een objectieve conclusie te komen die goed onderbouwd is.

- **In welke context is het VRPD relevant en kan het voor een bijdrage zorgen aan de huidige logistieke uitdagingen?**

Deze vraag heeft toepassing op de routing van zowel vrachtwagens als drones in context van LMD. De verschillende uitdagingen en opportuniteiten voor drones, met betrekking tot routing, worden besproken. De focus ligt hierbij vooral op de mogelijke VRPD-varianten en hun opzet en toepassing. Routing heeft namelijk invloed op duurzaamheid, operationele kostenbesparing en stadslogistiek in context van LMD.

- **Wat zijn de uitdagingen die overbrugd moeten worden om een goede werking van drones in LMD te garanderen?**

Het antwoord op deze vraag zal een overzicht geven op de uitdagingen die geconfronteerd moeten worden om UAVs te implementeren in de samenleving. Het bespreekt functionele aspecten maar ook wet- en regelgeving. Wanneer deze uitdagingen overbrugd worden, wordt de integratie van drones in LMD gefaciliteerd.

1.3 Onderzoeksmethodologie

1.3.1 Literatuurstudie VRP(D)

In de literatuurstudie zijn de gebruikte bronnen afkomstig uit wetenschappelijke artikels en boeken. Voor huidige cijfers over het gebruik van drones werden krantenartikels en blogs geraadpleegd aangezien deze informatie steeds vernieuwd wordt en daardoor up-to-date is. Gezien de steeds groeiende hoeveelheid aan beschikbare literatuur over het onderwerp, is er gekozen voor een gerichte aanpak waarbij gebruik wordt gemaakt van betrouwbare bronnen. In dit onderzoek zijn er vooral bronnen geraadpleegd via de zoekmachine Google Scholar en EBSCO host. Om een goed inzicht te krijgen in het gebruik van drones in LMD, werden er ook specifieke websites geraadpleegd met artikels die zich richten op het gebruik van drones en gerelateerde technologieën. Ook werden er websites geraadpleegd van bedrijven die het potentieel van drones onderzoeken. Deze bronnen bieden een breed scala aan relevante en goed onderbouwde literatuur.

De zoektocht naar relevante publicaties richt zich op twee onderzoeksgebieden. Eerst wordt de groei van de e-commerce, het belang van LMD en de potentiële rol van drones in de logistieke sector onderzocht. Daarna wordt er gefocust op een tweede domein, het vehicle routing problem met drones (VRPD), waarbij gefocust wordt op de batterijcapaciteit van UAV's. Omdat dit onderzoek ook een praktijkgedeelte omvat, wordt een volledige systematische literatuurstudie buiten beschouwing gelaten. De focus ligt op literatuur die vaak toepasbaar is voor het praktijkgedeelte.

Voor het tweede onderzoeksdomein, dat zich deels richt op de batterijcapaciteit, zijn verschillende zoektermen gehanteerd. De batterijcapaciteit wordt namelijk niet veel gebruikt binnen een VRPD als hoofdonderzoek, dus waren er andere zoektermen nodig. Bij een EVRP komt dit aspect vaker voor. De zoektocht naar relevante bronnen startte met papers over het VRPD die gebruik maken van variërend dronebereik. Voor overige literatuur over de batterijcapaciteit van drones werd gebruik gemaakt van specifiekere zoektermen.

1.3.2 Praktijkgedeelte

In het praktijkgedeelte van deze masterproef wordt met behulp van LINGO-software een VRPD-model ontwikkeld met één vrachtwagen en één drone. De vrachtwagen gebruikt knooppunten om te parkeren en zo een drone uit te sturen om klanten te bezoeken. Eerst werd dit model wiskundig geformuleerd op papier om een overzicht te hebben van de relevante beperkingen die geïntegreerd moesten worden. Vervolgens, na het model over te zetten naar de software, werden verschillende opstellingen met veranderde parameters onderzocht in LINGO, om het effect van de batterijcapaciteit op de totale reistijd en de structuur van de route te bestuderen. Ook wordt er geanalyseerd hoe de veranderende factoren de efficiëntie en prestaties van het leveringsproces beïnvloeden. Dit model werd geïnspireerd door de inzichten uit de literatuurstudie, maar is zelfstandig opgebouwd zonder gebruik te maken van formuleringen in bestaand onderzoek. Vervolgens worden de resultaten geanalyseerd om een antwoord te formuleren op de onderzoeksvragen.

2. Literatuurstudie

In dit hoofdstuk worden hedendaagse logistieke uitdagingen en het gebruik en de opportuniteiten van drones in LMD besproken. Ook wordt de belangrijke literatuur binnen het domein VRP en de uitbreiding tot het VRPD toegelicht. De verkregen inzichten zullen worden gebruikt om het probleem in het praktijkgedeelte te definiëren. Eerst wordt ingegaan op de huidige uitdagingen in de logistiek en de ontwikkelingen binnen het gebied van drones en meer specifiek in LMD. Hierbij wordt de groei van e-commerce toegelicht en welke impact dit heeft op logistieke kwesties. Daarna volgt een toelichting van enkele VRP-modellen en VRPD-modellen. Vervolgens wordt er dieper ingegaan op de mogelijke doelfuncties en de verschillende beperkingen die auteurs gebruikt hebben om hun model te bekomen. Er zal ook aandacht zijn voor diverse oplossingsmethoden die gehanteerd zijn om optimalisatieproblemen van VRPD-modellen op te lossen. Daarnaast wordt een vergelijking van de operationele kosten tussen de traditionele vervoersmethoden en de opkomende drones toegelicht. Ten slotte wordt de rol van batterijcapaciteit bij het gebruik van drones besproken.

2.1 De groei van e-commerce

E-commerce, of elektronische handel, verwijst naar het kopen en verkopen van goederen en diensten via het internet (Vos et al., 2016). Dit omvat het volledige proces vanaf de productselectie en betaling tot de levering, en speelt een centrale rol in zowel de business-to-consumer (B2C) als business-to-business (B2B) markten. Met de opkomst van technologieën zoals smartphones en online betaalplatforms is e-commerce toegankelijker dan ooit, waardoor consumenten op elk moment en vanaf elke locatie digitaal aankopen kunnen doen op een winkelplatform. Er is dan ook een sterk groeiende trend in deze markt (Ho et al., 2007).

Met de evolutie van e-commerce stijgt de vraag naar snelle en kosteneffectieve leveringen (Joerss et al., 2016). Dit leidt tot de snelle ontwikkeling van on-demand logistieke diensten (Kamarainen et al., 2001). Deze diensten worden ontwikkeld om aan de verschillende noden in ons dagelijks leven te voldoen. Er is een vraag om boodschappen van consumenten leveren, documenten te transporteren en medicatie te vervoeren voor de zorgsector en de private sector (Kamarainen et al., 2001). De markt van on-demand logistiek is een groeiende markt, de groei bedroeg ongeveer 7,30% in 2022 en 2023. Dit resulteert in een totaal marktvolume van 466 miljard euro tegen 2027 (Lozzi et al., 2022). Er is dus een spoedige nood aan een betrouwbaar en effectief systeem voor bedrijven in de e-commerce sector om kwaliteit te verzekeren doorheen deze groeiende markt.

Volgens een voorspelling van het World Economic zal de groei in de e-commerce sector leiden tot 36% meer leveringsvoertuigen in de steden tegen 2030, wat gepaard gaat met ongeveer 32% meer congestie (WEF, 2020). Het gebruik van vrachtwagen zorgt voor congestie in steden, een hoge uitstoot. De maatschappij is tegen groot gebruik van vrachtwagens binnen steden, vooral door veiligheidsredenen (Narayana et al., 2013). Er is dus nood aan alternatieve optimalisatie door de groeiende congestie, uitstoot en hoge eisen van de consument. Hiernaast wordt voorspeld dat het

aantal leveringen in de last mile delivery zal groeien met 78% (PTV Logistics, 2025). Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door de toename in kleinere leveringen en het aantal eindbestemmingen (Stanley, 2024).

De groei van deze sector vergroot het comfort voor de consument, maar brengt ook uitdagingen mee voor dichtbevolkte gebieden zoals een toenemende drukte en verkeersproblemen. Zo ervaren transportbedrijven een groter aantal stops, een lagere voertuigbezetting en inefficiënte leveringen door menselijke handelingen en fouten (Boyer et al., 2009). Hierdoor zullen er hoge kosten gemaakt moeten worden voor het laatste deel van de supply chain (Raghunatha, 2023). Daarnaast is transport verantwoordelijk voor een aanzienlijk deel van de luchtvervuiling en geluidsoverlast, wat niet alleen de volksgezondheid bedreigt, maar ook de klimaatdoelstellingen onder druk zet (Taniguchi, 2016). De druk op stedelijke infrastructuur groeit enorm. De hoge klantenverwachtingen dwingen bedrijven en regulatoren tot efficiëntere processen en innovatieve oplossingen (Toilier, 2016).

2.2 De opkomst van drones binnen de supply chain

Bezorgingsdrones zijn klaar om een essentieel onderdeel te worden van de logistieke industrie en de groeiende e-commerce sector. In april 2024 bereikte Zipline, een pionier op het gebied van dronebezorging, zijn miljoenste commerciële levering, waarbij 70% van deze leveringen in de laatste twee jaar plaatsvond (De Jager, 2024). In de afgelopen 3 jaar waren er meer dan 660.000 commerciële droneleveringen. In 2022 vonden er dagelijks meer dan 2.000 dronebezorgingen plaats over de hele wereld en had de internationale markt voor vrachtdrones een waarde van 1,2 miljard USD. Bovendien zal deze naar verwachting stijgen met een jaarlijks percentage van 22% om tegen 2030 een waarde van 9,4 miljard USD te bereiken (VMR, 2024).

Daarnaast heeft de COVID-19-pandemie het consumentengedrag blijvend veranderd (Saenz et al., 2022), tijdens lockdowns en sociale beperkingen wendden mensen zich massaal tot het online winkelen, wat leidde tot een felle opkomst van de e-commerce sector (Van Hall, 2020). Door de pandemie staan consumenten meer open voor innovatieve bezorgmethodes, zoals droneleveringen (Mohsan, 2022). Deze verschuiving in consumentengedrag heeft geleid tot een versnelde ontwikkeling van dronetechnologie binnen stedelijke gebieden. Bovendien heeft de opkomst van direct-to-consumer (D2C) modellen bedrijven in staat gesteld om zonder tussenpersonen direct aan consumenten te verkopen, wat heeft geleid tot een meer gepersonaliseerde winkelervaring en versterkte klantrelaties (Van Hall, 2020).

De pandemie stimuleerde ook de ontwikkeling in medische toepassingen van drones. Ze werden gebruikt om testmonsters en vaccins snel te vervoeren tussen ziekenhuizen en laboratoria, wat hielp bij het versnellen van de diagnostiek en behandeling (Yperman, 2023). Een ander effect van COVID-19 was de versoepeling van regelgeving rondom het gebruik van drones (Mohsan, 2022). Dit leidde tot versnelde experimenten met autonome dronevluchten en bredere acceptatie van deze

technologie in de samenleving. De pandemie was dus een katalysator om het gebruik van drones te implementeren in de maatschappij.

De huidige trends in automatisering, digitalisering en data-uitwisseling beïnvloeden zowel organisaties als supply chains (Pessot et al., 2023). Nieuwe technologieën zoals het internet der dingen (IoT), blockchain, augmented reality, robotica en artificiële intelligentie veranderen de manier waarop producten worden geproduceerd, getest en gedistribueerd (Mohsan, 2022). Hierdoor krijgen drones steeds meer aandacht vanwege hun potentieel in logistiek en andere operaties (Rejeb et al., 2021). Bedrijven zoals Amazon, DHL en Google onderzoeken het gebruik van drones voor bezorging, vooral voor de last-mile delivery. Dit is de laatste stap van de supply chain, waarbij de goederen geleverd worden tot aan de klant.

Het voordeel van het gebruik van drones is hun vermogen om leveringen aanzienlijk sneller uit te voeren (Campbell et al., 2017) zonder verkeersopstoppingen, en dat op ieder moment van de dag (Zhang, 2016). Dit maakt het mogelijk om meer bezorgingen binnen korte tijd af te handelen, zelfs in drukke stedelijke gebieden. Het gebruik van drones vergroot de flexibiliteit van bedrijven aanzienlijk en kan bijdragen aan een hogere klanttevredenheid, wat een meerwaarde creëert voor het bedrijf (Vakulenko, 2019).

Een ander positief aspect is de potentiële kostenbesparing die drones bieden voor logistieke activiteiten. Een drone verbruikt minder energie in vergelijking met voertuigen op fossiele brandstoffen, wat bijdraagt aan lagere operationele kosten en een duurzamer bedrijfsmodel. Dit maakt drones niet alleen economisch aantrekkelijk, maar ook een groenere optie voor de toekomst (WEF, 2020). We zien de laatste jaren een duidelijke trend in de groene richting bij transport, zowel voor personenwagens als vrachtwagens (Sanguesa et al., 2021). Deze besparing van operationele kosten wordt verder toegelicht in sectie 2.6.

Helaas is er ook een andere zijde aan de medaille. Zo zijn onder andere de weersomstandigheden een factor die wel tot hindernissen kan leiden voor de drones (Gao, 2021). Zo kan stormweer leiden tot incidenten met drones door hevige wind. Indien dit voorspelbaar is mogen drones niet het luchtruim in, wat de levering van de producten tot de eindklant zal uitstellen. Dit zal de klant niet bevallen. Extreme koud kan ook een negatieve impact hebben op de prestatie van de UAV. De batterijcapaciteit daalt namelijk bij lagere temperaturen. Zoals vermeld in de inleiding, zijn er ook problemen rond de maatschappelijke acceptatie van drones door hun visuele vervuiling, mogelijke incidenten en andere maatschappelijke kosten.

Volgens Akram et al. (2017) brengt de commerciële inzet van drones in logistieke processen complexe uitdagingen met zich mee, vooral op het gebied van wet- en regelgeving. Operatoren zijn verplicht om te voldoen aan specifieke certificerings- en operationele vereisten. Internationale samenwerking is essentieel, vooral voor grensoverschrijdende leveringen. Richtlijnen van organisaties zoals de International Civil Aviation Organization zorgen ervoor dat drones aan uniforme normen voldoen. In sectie 2.3 wordt dieper ingegaan op de uitdagingen voor drones.

In de Verenigde Staten heeft de Federal Aviation Administration (FAA) een belangrijke rol in het reguleren van dronevluchten. Zij stellen eisen zoals geofencing technologie en het vermijden van no-fly zones, zoals luchthavens en natuurgebieden (Jones, 2017). Dit zou uiteraard ongevallen kunnen veroorzaken of een effect kunnen hebben op de biodiversiteit. Daarnaast wordt er in zowel de VS als Europa volop geïnvesteerd in de ontwikkeling Unmanned Traffic Management (UTM) systemen om veilig en efficiënt droneverkeer te beheren. Deze systemen faciliteren real-time routebeheer, communicatie tussen drones en verkeersleiders, en noodmaatregelen bij onvoorziene omstandigheden (Murray, 2015).

In Europa stelt de Algemene Verordening Gegevensbescherming strikte eisen aan het verzamelen en het verwerken van persoonlijke gegevens tijdens dronevluchten, waarbij operators verplicht zijn om bewoners te informeren en de gegevens anoniem te maken (GDPR, 2016). Geluidsnormen zijn ook van groot belang, vooral in stedelijke gebieden waar drones overlast kunnen veroorzaken. Fabrikanten worden daarom aangespoord om stillere technologieën te ontwikkelen. Momenteel is gebruik van drones, met toepassing in LMD, in België dan ook verboden.

Ondanks de huidige beperkingen zijn er ontwikkelingen die de inzet van drones voor LMD in de toekomst kunnen faciliteren volgens Mohammad et al. (2023). Technologische vooruitgangen, zoals verbeterde navigatiesystemen en sensoren voor obstakelvermijding, kunnen de veiligheid en efficiëntie van drones verhogen. Daarnaast kunnen aanpassingen in de regelgeving, gebaseerd op succesvolle proefprojecten en publieke acceptatie, de weg vrijmaken voor een bredere toepassing van drones in de logistieke sector. Het is echter belangrijk dat de ontwikkelingen hand in hand gaan met aandacht voor privacy voor de burgers, veiligheid en maatschappelijke acceptatie om een succesvolle integratie van drones in de maatschappij te realiseren.

2.3 Drones in last-mile delivery

In dit onderdeel worden de nieuwe trends en de uitdagingen van drones in last-mile delivery besproken. LMD wordt door Jazairy et al. (2023) gedefinieerd als:

"De laatste fase van een bezorgproces van een item, die plaatsvindt vanaf het orderpenetratiepunt tot aan het door de ontvanger gekozen bestemmingspunt."

Waarbij het orderpenetratiepunt verwijst naar de locatie waar de voorraad zich bevindt (bijvoorbeeld een distributiecentrum, fabriek of winkel) en waarbij een consumentenbestelling het proces in gang zet. Het is het punt waar de bestelling wordt verwerkt en de levering begint. Vervolgens wordt het bestemmingpunt geselecteerd door de consument zoals een woning, kantoor of een andere locatie. Het item omvat verschillende soorten goederen die worden geleverd in de vorm van pakketten.

Zoals gezegd is er een sterke groei in de e-commerce sector. Hiernaast verhoogt ook de urbanisatie de vraag naar efficiënte en duurzame bezorgdiensten (Zhang, 2016). Drones bieden hierbij kansen dankzij hun snelheid en lagere kosten, maar brengen ook technische uitdagingen met zich mee, zoals batterijbeheer en routeoptimalisatie. Voor een succesvolle implementatie is continue innovatie

en opvolging cruciaal, met focus op energie-efficiëntie, vrachtverdeling en het gebruik van hernieuwbare energie. Ook de rol van AI en machine learning is belangrijk om de duurzaamheid en prestaties van drones te verbeteren.

2.3.1 Nieuwe trends in LMD

Mohammad et al.(2023) bespreken de huidige trends in LMD, zoals de toenemende vraag naar efficiënte bezorgdiensten, die gedreven wordt door verschillende uitdagingen en ontwikkelingen. Het leveren tot aan de deur van de klant, last-mile delivery, is een populair onderwerp. Vooral in steden waar de bevolkingsdichtheid hoog is. Het toenemend volume in bestellingen wordt veroorzaakt door de groei in e-commerce (Joerss et al., 2016) en de urbanisatie (Zhang, 2016). Dit resulteert in een enorme groei van het aantal leveringen, wat logistieke uitdagingen met zich meebrengt.

Een groeiend aantal bestellingen leidt tot een groeiend aantal leveringen en dus een nood aan meer bezorgvoertuigen in stadscentra. Dit verergert congestie en vervuiling in stedelijke gebieden (Cattaruzza, 2017) en belast de infrastructuur. De nieuwe beleidsmaatregelen en een groeiend milieubewustzijn stimuleren bedrijven om duurzamere bezorgmethoden te ontwikkelen, zoals het gebruik van elektrische voertuigen. Volgens McDonald (2009) is er bij de eindklant, de gewone burger, meer aandacht voor duurzaamheid en groene bezorgopties.

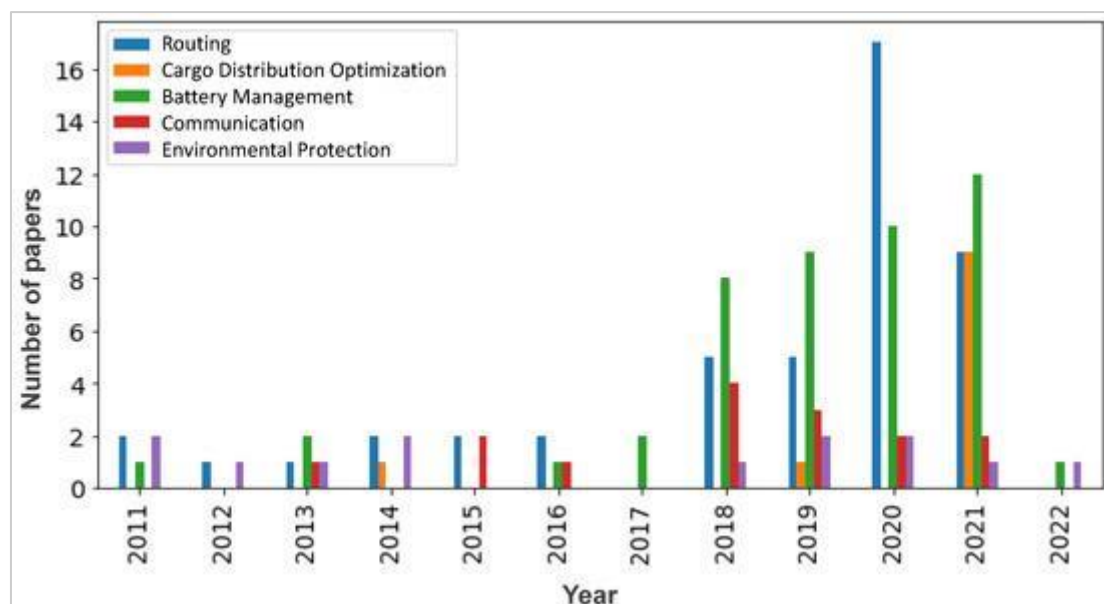
Verder bespreken Mohammad et al. (2023) en Tiwapat et al. (2018) het toenemend belang van lage kosten om hun diensten zo goedkoop mogelijk door te rekenen aan de klant. Hierbij kunnen autonome UAV's een bijdrage leveren. In sectie 2.6 wordt de kostenbesparing van drones ten opzichte van traditionele bezorgmethoden besproken. Ook het belang van snelle leveringen is toegenomen (Joerss et al., 2016). Dit creëert een grote tijdsdruk en vereist flexibele en schaalbare bezorgstructuren die snel kunnen worden aangepast aan veranderingen in de vraag. Hierbij speelt de optimale inzet en routing van voertuigen een belangrijke rol in stedelijke gebieden.

Zowel Mohammad et al. (2023) als Tiwapat et al. (2018) vermelden ook de rol van technologie. Dankzij de technologische vooruitgangen verschijnen er steeds meer vernieuwende concepten voor last-mile delivery, waarbij onderzoekers strategische en operationele vraagstukken bestuderen vanuit een operationeel onderzoeksperspectief. Hoewel veel van deze nieuwe bezorgmethoden veelbelovend zijn, vereisen ze nog verdere optimalisatie en onderzoek op het gebied van technologie en operationele efficiëntie. Zo is batterijbeheer een populair onderwerp, omdat er veel verbetering mogelijk is op dit vlak. In de toekomst zal een systematische vergelijking van zowel bestaande als nieuwe bezorgconcepten cruciaal zijn om de beste keuzes te maken voor verschillende scenario's. Het combineren van bezorgmethoden, zoals vrachtwagens met drones, biedt interessante mogelijkheden, maar vraagt om grondige analyse en afstemming (Murray, 2015). Last-mile delivery blijft daarmee een dynamisch onderzoeksgebied met grote praktische relevantie voor de komende jaren.

In lijn met de groeiende innovatie in last-mile delivery, richt het onderzoek van Eskandaripour et al. (2023) zich op de opkomst van duurzame, groene bezorgmethoden, waarbij drones een sleutelrol spelen als milieuvriendelijke en efficiënte optie. Toch brengt dronebezorging technische uitdagingen

met zich mee, waaronder routing, vrachtverdeling, batterijbeheer, datacommunicatie en milieubescherming, die essentieel zijn voor een soepele en duurzame implementatie. Vooral batterijbeheer krijgt steeds meer aandacht, zoals blijkt uit de toename van publicaties over dit onderwerp sinds 2018. Dit weerspiegelt het groeiende belang van energie-efficiëntie en beheerstrategieën, nu drones steeds vaker worden ingezet voor last-mile leveringen in sectoren als e-commerce, voedsel- en medicijnbezorging.

Naast efficiënt batterijbeheer blijft het routeringsprobleem een hot topic in wetenschappelijke publicaties tussen 2011 en 2022 (Eskandaripour et al., 2023). De uitdaging ligt in het efficiënt plannen van drone-routes, waarbij zowel het energieverbruik wordt geminimaliseerd als de levertijd wordt geoptimaliseerd. Dit vraagstuk blijft een essentieel onderzoeksgebied, aangezien een slechte routeplanning kan leiden tot hogere operationele kosten en een verminderde duurzaamheid. Daarnaast krijgen ook vrachtverdeling, datacommunicatie en milieubescherming periodiek aandacht van onderzoekers, wat de veelzijdige en dynamische aard van dronebezorging als onderzoeksgebied benadrukt. Het aantal publicaties met betrekking tot die aspecten binnen VRP wordt getoond in figuur 1. Volgens Eskandaripour et al. (2023) zal het aantal publicaties blijven toenemen, aangezien veel onderzoekers geloven dat het gebruik van drones in LMD ooit een werkelijkheid zal zijn. Deze figuur heeft echter betrekking op de aspecten van het algemene VRP.



Figuur 1: Aantal publicaties over routing, batterijmanagement etc (Eskandaripour et al., 2023)

Naast de groei van het aantal publicaties, wat getoond wordt door Eskandaripour et al. (2023) in hun grafiek, zijn er nog onderzoekers die het toenemend belang van routing, batterijmanagement en datauitwisseling binnen VRP onderstrepen. Een belangrijk onderzoek werd uitgevoerd door Jazairy et al. (2023). Zij lichten de groeiende belangstelling voor droneleveringen toe in hun onderzoek. In hun onderzoek analyseerden ze 499 artikels over het gebruik van drones. Dit aantal werd gereduceerd tot 307 door de artikels die geen toepassing hadden op LMD, maar bijvoorbeeld op gebruik in de landbouw, te elimineren van het onderzoek.

De analyse van 307 artikelen, die betrekking hebben op droneleveringen in LMD, door Jazairy et al. (2023) toont een groeiende academische belangstelling voor droneleveringen, waarbij de Verenigde Staten (30%) en China (17%) de belangrijkste bijdragen leveren. Qua onderzoeksmethoden domineert modellering met 53%. Belangrijke toepassingssectoren omvatten e-commerce, gezondheidszorg, humanitaire hulpverlening en voedselbezorging. Deze trend sluit aan bij de voorspelde groei van de dronemarkt naar een waarde van 61,95 miljard USD in 2027 (VMR, 2024).

Zoals gezegd is modellering dominant (53%). Het richt zich voornamelijk op multi-objectieve functies of routeringsvalidatiemethoden zoals het Vehicle Routing Problem (VRP) en het Traveling Salesman Problem (TSP). Het verschil tussen deze twee modellen wordt later in deze masterproef besproken. Gemengde methoden (26%) combineren modellering met numerieke cases of experimenten. Experimenten (6%) richten zich op het testen van drones in realistische toepassingen met gebruik van echte data. Surveys (6%) verkennen gedragsvoorkeuren met betrekking tot het gebruik van drones. Reviews (5%) bieden een synthese van bijdragen rond thema's zoals routing, maatschappelijke impact of integratie in de gezondheidszorg. Tot slot omvatten casestudy's (3%) zowel zeven kwantitatieve analyses van dronetoepassingen in de gezondheidszorg als drie kwalitatieve beoordelingen van publieke en expertinzichten in droneleveringen. De dominantie van modelgebaseerd onderzoek benadrukt de technische focus binnen het veld, terwijl er ruimte blijft voor logistiek management om niet-modelgebaseerde aspecten verder te verkennen.

2.3.2 Uitdagingen van drones in LMD

De implementatie van drones in last mile delivery wordt geconfronteerd met diverse operationele obstakels die de hedendaagse uitvoerbaarheid beperken. Het artikel van Jazairy et al. (2023) beschrijft twaalf uitdagingen voor de implementatie van drones in last mile delivery. Ze groeperen de twaalf uitdagingen in vier verschillende categorieën: aspecten met betrekking tot de zender, de ontvanger, regulatoren en de maatschappij. Deze indeling wordt gebruikt door meerdere papers. De auteurs voorzien per uitdaging een gepaste oplossing om UAVs te implementeren en een opportuniteit voor de nieuwe technologie in de maatschappij. In deze sectie zoomen we in op enkele van deze uitdagingen en de barrières die zij vormen. De uitdagingen omtrent wet- en regelgeving worden besproken in de volgende sectie.

Weersomstandigheden vormen een primaire uitdaging: sterke wind, regen en lage temperaturen kunnen de stabiliteit en batterijprestaties van drones nadelig beïnvloeden. In het artikel van Jazairy et al. (2023) zou dit aspect vallen onder de maatschappij aangezien het betrekking heeft tot veiligheid. Onderzoek van Choi et al. (2021) toont aan dat windsnelheden boven 10 m/s de nauwkeurigheid van drone-landingen met 30% verminderen, wat de veiligheid en efficiëntie van het concept in gedrang kan brengen. Voorlopig stelt de FAA strikte regels op zodat dronevluchten tijdens ongunstig weer verboden worden.

De beveiliging van UAVs vormt ook een groeiende zorg voor de samenleving. Volgens Hartmann et al. (2020) zijn drones kwetsbaar voor hacking, waarbij GPS-spoofing of signaalverstoring de controle kan overnemen, met potentieel risico op diefstal van pakketten of drones zelf. Daarnaast is verkeersmanagement zeer complex in dichtbevolkte gebieden: het luchtruim moet worden gedeeld met andere drones en recreatieve vliegobjecten of dieren, wat botsingsrisico's verhoogt. De FAA voorspelt daarom dat zonder geavanceerde Unmanned Traffic Management systemen, zoals die in ontwikkeling zijn bij Wing en NASA, grootschalige drone-LMD onhaalbaar blijft (FAA, 2025). Eens er een UTM-systeem wordt geïntroduceerd dat veiligheid verzekert, kan het gebruik van UAVs in LMD haalbaar worden.

Hiernaast vereist retourlogistiek, het ophalen van retourzendingen, extra aanpassingen aan de uitrusting van de drone en de routeplanning. Dit vergroot de operationele complexiteit volgens Lee et al. (2021). Zij geven aan dat deze uitdagingen vragen om een combinatie van technologische innovatie, infrastructuurinvesteringen en regelgevende ondersteuning om drones levensvatbaar te maken voor LMD. In het artikel van Jazairy et al. (2023) valt deze uitdaging binnen de groeperingen die betrekking hebben op de zender en de klant. De zender, het bedrijf, wil de de klantwaarde maximaliseren door retourlogistiek aan te bieden.

Hiernaast bespreken Jazairy et al. (2023) een volgende uitdaging: de vrachtverdeling. Ook volgens Naumov et al. (2021) is dit belangrijke uitdaging binnen last-mile delivery. Pakketten moeten efficiënt verdeeld worden over verschillende bezorgvoertuigen. Deze verdeling wordt beïnvloed door factoren zoals voertuigcapaciteiten, veiligheidsbeoordelingen en energieverbruik. Tegelijkertijd variëren pakketten in grootte, gewicht, bestemming, urgentie en andere logistieke vereisten, wat de complexiteit van het distributieproces vergroot. In het artikel van Jazairy et al. (2023) valt dit onder een uitdaging met betrekking tot de zender, aangezien de drone de capaciteit moet hebben om aan de vraag te voldoen. Bruni et al. (2023) ontwikkelden een veelbelovend machine-learningmodel voor het voorspellen van pakketvolumes en het benodigde aantal voertuigen op basis van historische gegevens. Het clusteren van klantlocaties en de toewijzing van voertuigen per cluster kan bijdragen aan een efficiëntere distributie en optimalisatie van de vloot. Deze uitdaging is dus te overbruggen aan de hand van real-time data en AI.

Een ander aspect wat de implementatie van UAVs volgens Jazairy et al. (2023) belemmert, is het gebrek aan toegewezen infrastructuur zoals landingplaatsen, laadstations of luchtverkeerssystemen die de vluchten van drones controleren en monitoren. In steden is er een tekort aan ruimte, terwijl er in landelijke gebieden grote afstanden te overbruggen zijn. Deze tekortkomingen limiteren de schaalbaarheid van de technologie en is een barrière voor regulatoren en operatoren om drones te integreren in de supply chain.

Ook de sociale acceptatie vormt een obstakel om drones te implementeren in last mile delivery volgens Jazairy et al. (2023). Sociale acceptatie speelt een belangrijke rol bij de inzet van drones, aangezien publieke weerstand droneprogramma's aanzienlijk kan vertragen of zelfs volledig kan tegenhouden. Een belangrijke factor hierbij is de zorg over privacy: drones die zijn uitgerust met

camera's of sensoren roepen angst op voor surveillance en ongewenste gegevensverzameling, wat het draagvlak onder de bevolking vermindert. Daarnaast vormt geluidsoverlast een serieus obstakel, vooral in stedelijke gebieden, beïnvloedt het de bereidheid van mensen om dronebezorging te accepteren. Voor beleidsmakers is het daarom essentieel om deze sociale zorgen serieus te nemen en hier actief op in te spelen.

Ten slotte blijft batterijduur een bottleneck; de meeste commerciële drones hebben een vliegbereik van 20 tot 30 minuten, wat onvoldoende is voor langere LMD-routes zonder oplaadstations. Er zijn echter steeds innovaties rondom batterijcapaciteit die veelbelovend zijn zoals de "lichtgewicht lithiumzwavelbatterijen" (Service, 2018). Het tekort aan geschikte infrastructuur voor levering sluit hierbij aan. Murray et al. (2015) introduceerde het concept van "drone hubs" als oplossing, maar de aanleg hiervan vereist significante investeringen en ruimtelijke planning. In landelijke gebieden daarentegen bemoeilijkt de grotere afstand tussen adressen de efficiëntie, waardoor meer oplaadbeurten nodig zouden zijn (Goodchild & Toy, 2018).

Een andere uitdaging over batterijbeheer wordt besproken door Torabbeigi (2020). Hij wijst erop dat energie-efficiëntie en betrouwbaarheid van batterijen essentieel zijn voor de effectiviteit van drones. Twee belangrijke aspecten spelen hierin een rol: (1) het optimaliseren van batterijverbruik door aanpassingen in drone-instellingen en operationele parameters en (2) strategieën voor batterijvervangning of opladen. Batterijverbruik wordt beïnvloed door variabelen zoals pakketgewicht, vliegroute, weersomstandigheden en de locatie van laadstations.

Een laatste uitdaging voor drones volgens Jazairy et al. (2023), wordt ook besproken door Gharibi et al. (2016). Zij beweren dat data-uitwisseling via vliegende ad-hoc netwerken en het Internet of Drones real-time besluitvorming en efficiënte coördinatie mogelijk maakt. Een visualisatie van het IoD wordt gegeven in figuur 2. Tegelijkertijd brengen ze cybersecurityrisico's en de noodzaak van veilige draadloze communicatie uitdagingen met zich mee, waarvoor AI als oplossing wordt onderzocht. De toekomstige ontwikkeling van dronebezorging zal afhangen van verbeteringen in autonome systemen, energiebeheer en logistieke optimalisatie. Volgens Gharibi et al. (2016) is dit systeem cruciaal om veiligheid en efficiëntie te garanderen, en dus om drones een plek te geven in de maatschappij.

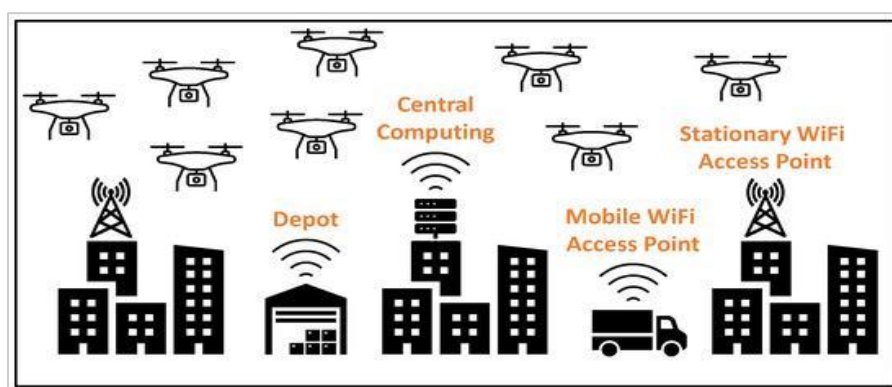


Figure 2: Internet of Drones (Gharibi et al., 2016)

2.3.3 Wetgeving, regelgeving en ethiek

Het gebruik van drones voor last mile delivery wordt sterk beïnvloed door juridische en regelgevende kaders, die per regio aanzienlijk kunnen verschillen. In de Europese Unie heeft de European Union Aviation Safety Agency (EASA) uniforme regels opgesteld, door middel van een verordening, die het gebruik van drones boven bevolkte gebieden regelt en vereist dat operators risicoanalyses uitvoeren (EASA, 2024).

Een belangrijke beperking is de Visual Line of Sight (VLOS)-regel, die voorschrijft dat drones binnen het zicht van de operator moeten blijven, wat de efficiëntie van LMD in stedelijke omgevingen beperkt. Deze beperking stuit op weerstand bij burgers, die drones in het luchtruim vaak ervaren als visuele hinder of verstoring van het stadsbeeld. Zij zouden liever geen drones zien of horen vliegen in het luchtruim volgens de enquête van EASA (2024). Voor Beyond Visual Line of Sight (BVLOS)-operaties, wat essentieel is voor grootschalige dronebezorging, zijn speciale vergunningen nodig die afhankelijk zijn van geavanceerde technologieën zoals "Detect and Avoid"-systemen (Clarke et al., 2014). Deze technologieën zijn nog niet genoeg ontwikkeld om voldoende veiligheid te garanderen. Daarnaast roept aansprakelijkheid vragen op: wie is verantwoordelijk bij een crash die schade veroorzaakt: de operator, de fabrikant, of de softwareleverancier?

Een studie van Villasenor (2019) benadrukt dat het ontbreken van duidelijke aansprakelijkheidsregels de adoptie van drones in LMD vertraagt. Daarnaast roept het dronegebruik in LMD vragen op over de milieu-impact. Terwijl drones potentieel CO₂-uitstoot verminderen vergeleken met vrachtwagens (Goodchild & Toy, 2018), profiteren vooral stedelijke gebieden met hoge bezorgvolumes, waardoor afgelegen of minder welvarende regio's mogelijk achterblijven. Bovendien kan geluidsoverlast, met drones die tot 70-80 decibel produceren, leiden tot gezondheidsproblemen zoals stress, vooral in dichtbevolkte wijken (Clarke et al., 2014). Hoewel drones de CO₂-uitstoot kunnen verminderen, hangt hun milieu-impact af van batterijtechnologie. De productie en recycling van batterijen brengen grote milieukosten met zich mee, die de duurzaamheidsvoordelen kunnen ondermijnen als ze niet goed worden beheerd (Balassa et al., 2023).

Naast regels rond veiligheid, vormt privacy een centrale juridische en ethische kwestie. Drones zijn uitgerust met camera's en sensoren voor navigatie en kunnen onbedoeld data verzamelen over privéterreinen, wat in strijd kan zijn met de Algemene Verordening Gegevensbescherming (GDPR, 2016). Onderzoek van Solove (2021) wijst erop dat de constante aanwezigheid van drones boven woonwijken kan leiden tot een "panoptisch effect", waarbij burgers zich voortdurend bekeken voelen, wat maatschappelijke weerstand veroorzaakt. Publieke acceptatie hangt af van hoe deze ethische spanningen worden aangepakt, waarbij de transparantie over datagebruik, milieu- en kostenvoordelen cruciaal is.

Daar bovenop komen nog andere uitdagingen die de implementatie van drones voor LMD beïnvloeden. Volgens de regelgeving in EASA (2018) is een eerste aspect het luchtverkeersbeheer

(SESAR, 2017). Voor grootschalige BVLOS-operaties is een robuust systeem zoals "U-space" essentieel, een digitaal framework dat droneverkeer op lage hoogte coördineert en integreert met het bestaande luchtruim. Dit vereist niet alleen technische innovaties, zoals real-time monitoring, maar ook juridische harmonisatie om conflicten met bemande luchtvaart te voorkomen en veiligheid te verzekeren (EASA, 2024).

Een ander belangrijk punt is cybersecurity, wat beschreven wordt door Kumar et al. (2021). Drones vertrouwen op digitale netwerken voor navigatie en communicatie, wat hen kwetsbaar maakt voor hacking of datamanipulatie. Een beveiligingslek kan leiden tot ongelukken of misbruik van gegevens, wat aanvullende regelgeving en robuuste beveiligingsprotocollen vereist. Daarnaast speelt de impact op de arbeidsmarkt een rol. De adoptie van drones kan traditionele banen in de bezorgsector, zoals die van chauffeurs, bedreigen. Dit roept ethische vragen op over de verantwoordelijkheid van bedrijven en overheden om getroffen werknemers te ondersteunen, bijvoorbeeld via omscholing. Tegelijkertijd kan de technologie nieuwe banen creëren, zoals drone-operatoren of technici, maar deze verschuiving vraagt een zorgvuldige aanpak om sociale ongelijkheid te minimaliseren (Frey & Osborne, 2017).

Ten slotte is het behalen van de correcte certificaat-benodigdheden een complex gegeven. De verkrijgen van het 'Part 135 Air Carrier Certificate' van de FAA is een complex process, waarbij enkel bedrijven zoals UPS, Amazon en Wing het gehaald hebben (FAA, 2025). Dit proces heeft dan ook geleid tot stopzettingen binnen deze bedrijven: zo werden enkele projecten zoals de 'Parcelcopter' van DHL en Amazon Prime Air UK al stopgezet.

2.3.4 Oplossingen om uitdagingen te overbruggen

Jazairy et al. (2023) bespreken ook enkele oplossingen om de uitdagingen, die de implementatie van UAVs met zich meebrengen, te overkomen.

Ten eerste is het gebruik van systeemdenken een belangrijke benadering volgens hen, waarbij kosten niet afzonderlijk, maar holistisch worden beoordeeld. Factoren zoals schaalvoordelen, onderhouds- en afschrijvingspercentages, de verhouding tussen laadvermogen en energieverbruik, combinaties van drones en vrachtwagens, flexibiliteit in bezorgtijden, klantverspreiding en bevolkingsdichtheid dienen gezamenlijk te worden meegenomen in de analyse. Door deze integrale benadering wordt een realistischer beeld verkregen van de economische haalbaarheid van dronebezorging in verschillende contexten.

De uitrol van drone-infrastructuur vormt een cruciaal aspect dat toegelicht wordt door Jazairy et al. (2023) om drones te implementeren in de logistieke wereld. Investerings in vertiports (verticaal opstijg- en landingslocaties), oplaadstations en specifieke verkeerscontrolesystemen zijn noodzakelijk om drones op grote schaal in te zetten. Een goed ontwikkeld infrastructuurnetwerk ondersteunt niet alleen de efficiëntie en veiligheid, maar maakt ook de integratie met bestaande logistieke systemen mogelijk.

Technologische vooruitgang speelt eveneens een cruciale rol. Innovaties richten zich op het verbeteren van de batterijduur (Ahmad et al., 2020), waardoor drones langere afstanden kunnen afleggen, en op het verhogen van het laadvermogen, zodat ze zwaardere en meer diverse pakketten kunnen vervoeren. Op deze manier kunnen drones nog efficiënter ingezet worden. Daarnaast worden navigatie- en botsingsvermijdingssystemen steeds geavanceerder, wat zowel de operationele efficiëntie als de veiligheid ten goede komt. Ook de uitrol van Unmanned Traffic Management-systemen is veelbelovend.

Een belangrijk onderzoeksgebied binnen batterijbeheer is de optimalisatie van energieverbruik. Verschillende studies, zoals die van Sorbelli et al. (2022), hebben algoritmen ontwikkeld om een balans te vinden tussen snelheid en reistijd, wat resulteert in een efficiënter energiegebruik. Daarnaast onderzochten ze het Multiple-Drone-Delivery Scheduling Problem, waarbij vrachtwagens en drones samenwerken om leveringen te optimaliseren en batterijgebruik optimaal in te zetten door strategische laadpunten toe te wijzen. Dit sluit aan bij het duurzaam omgaan met de beschikbare batterijcapaciteit, wat tevens kostenbesparend is.

Naast batterijoptimalisatie bij de routeplanning, spelen laadmogelijkheden en data-uitwisseling een cruciale rol in dronebezorging. Volgens Ahmad et al. (2020) kunnen batterijwisselstations wachttijden minimaliseren en de operationele efficiëntie verhogen, terwijl draadloos opladen tijdens de vlucht het bereik vergroot. Ook het VRPD-model dat wordt voorzien in het empirisch deel zal gebruik gemaakt worden van battery-swapping. Dit aspect is gebaseerd op de informatie gegeven door Ahmad et al. (2020). Alternatieve methoden zijn contact-based laden en contactloos laden. Contact-based veroorzaakt nog steeds wachttijden, en bij contactloos laden is het potentieel nog beperkt door de nood aan de juiste technologie. Een visualisatie hiervan wordt gegeven in figuur 3.



Figuur 3: Batterijwissel en contactloos laden (Ahmad et al., 2020)

Naast technologische ontwikkelingen is het opzetten van duidelijke en gestandaardiseerde regelgeving essentieel voor een veilige en schaalbare toepassing van drones (Clarke et al. 2014). Een voorbeeld hiervan is de Part 135 Air Carrier Certificate van de Amerikaanse FAA, toegekend aan onder andere Amazon, UPS en Wing (FAA, 2025). Beleidsmaatregelen moeten aandacht besteden aan luchtverkeersbeheer, veiligheidsnormen, certificeringsprocessen en privacykwesties, zodat innovatie kan plaatsvinden zonder de openbare veiligheid in gevaar te brengen.

Tot slot is publieke betrokkenheid een kritieke factor voor succes volgens Jazairy et al. (2023). Dit blijkt ook uit de onderzoeken van Yoo (2018) en Cornell (2024). Transparante communicatie naar burgers over de voordelen van drones, zoals snellere leveringen en een lagere ecologische voetafdruk, in combinatie met duidelijke databeleid, kan helpen om zorgen bij het publiek weg te nemen. Hiernaast kan een hogere acceptatiegraad ook leiden tot soepelere wetgeving met betrekking tot drones in LMD. Door middel van proefprojecten en publieke raadplegingen kunnen gemeenschappen actief worden betrokken bij het gebruik van drones in LMD. Dit vergroot het draagvlak voor droneleveringen en versterkt het vertrouwen in deze nieuwe technologie.

Volgens de resultaten van Cornell (2024) staat 80% van de stedelijke inwoners al open voor de implementatie van drones in LMD. Deze hindernis is dus zeker te overbruggen, en kan zelfs als een drijfveer worden gezien aangezien het bedrijven kan aansporen om de vraag van de consument voor snelle leveringen te vervullen. Wanneer de regulatoren overtuigd zijn dat de samenleving openstaat voor het gebruik van drones binnen LMD, zal de regelgeving sneller versoepeld kunnen worden. De acceptatiegraad stijgt wanneer het gaat over medische leveringen. In landelijke gebieden staat 67% van de burgers open voor luchttransport, deels door de beperkte beschikbaarheid van winkels en de langere afstanden die nodig zijn om goederen te verkrijgen. Dit cijfer stijgt naar 75% wanneer het gaat over medische leveringen.

Een enquête van EASA toonde in steden als Barcelona, Hamburg en Parijs aan dat 83% van de burgers positief stond tegenover drones, met 71% die zichzelf als potentiële gebruikers van dronebezorgdiensten beschouwde (EASA, 2024). De acceptatie was het hoogst voor toepassingen in noodgevallen en de gezondheidszorg. Voor dronegebruik in de retailsector reageerde 43% van de respondenten zeer positief. De resultaten toonden ook dat mensen die goed geïnformeerd zijn over het gebruik van drones in de logistiek vaker positief reageren dan mensen die niet veel van drones kennen. Voor logistiek in de gezondheidszorg en de retailsector blijken ouderen en gepensioneerden consequenter positief over het gebruik van drones dan jongeren en studenten. Dit is opvallend, aangezien jongeren doorgaans positiever staan tegenover nieuwe technologieën.

2.4 VRP modellen

2.4.1 Inleiding VRP

Efficiënte logistieke operaties groeien in belang, zeker door de groei van de e-commerce sector en de toenemende vraag naar snelle, kosteneffectieve leveringen door de consument (Joerss et al., 2016). Het Vehicle Routing Problem (VRP) speelt hierbij een sleutelrol: het optimaliseert de route van voertuigen die goederen leveren aan meerdere eindbestemmingen, rekening houdend met beperkingen zoals tijdvensters en de capaciteit van voertuigen (Desaulniers et al., 2002). Het VRP draagt niet alleen bij aan kostenbesparing en efficiëntie, maar ondersteunt ook duurzaamheid. Dit is steeds belangrijker in moderne supply chains (Saenz et al., 2022).

Het VRP dateert vanaf de introductie door Dantzig et al. in 1959, die het probleem formuleerden als het bepalen van optimale routes voor een vloot voertuigen. Sindsdien is het VRP geëvolueerd van een theoretisch vraagstuk tot een belangrijk instrument voor supply chain management. Dit is dan ook te zien aan de literatuur die tussen 1959 en 2008 jaarlijks met 6% groeide (Eksioglu et al., 2009). Het probleem bouwt voort op het Traveling Salesman Problem (TSP), maar breidt dit uit naar meerdere voertuigen, vaak met capaciteitsbeperkingen, en een depot als start- en eindpunt. Aanvankelijk werd het VRP met analytische methoden zoals lineaire programmering opgelost, maar vanwege de NP-hard complexiteit bleven deze oplossingen beperkt tot kleinschalige toepassingen (Dantzig et al., 1959).

Om realistischere en grotere scenario's aan te pakken, werden heuristische methoden ontwikkeld. Een voorbeeld is het "savings algorithm" van Clarke en Wright. Dit is een greedy heuristiek die bij elke stap de meest voordelige keuze maakt (Tunnisaki, 2023). Hoewel zulke heuristieken snelle en eenvoudige oplossingen bieden, garanderen ze niet altijd de optimale oplossing. Dit heeft geleid tot een veel verschillende benaderingen, waaronder klassieke heuristieken en meer geavanceerde optimalisatietechnieken, om het VRP zo actueel mogelijk te maken.

De literatuur over het VRP is zeer uitgebreid en omvat vele varianten die inspelen op specifieke beperkingen of toepassingen. Recente technologische trends, zoals het gebruik van real-time data, multi-objectieve optimalisatie en integratie van drones (Murray, 2015), evenals toekomstige ontwikkelingen zoals AI en quantum computing, illustreren de dynamiek van dit onderzoeksveld (Braekers et al., 2016). In deze masterproef wordt in een later hoofdstuk ingezoomd op het Vehicle Routing Problem met Drones (VRPD). Daarom focust dit deel zich op een beknopte bespreking van de belangrijkste VRP-varianten, zoals het Capacitated VRP (Laporte et al., 1983), het VRP met tijdvensters (Gendreau et al., 2015). Zo worden enkele van de meest relevante en meest gebruikte concepten besproken, die in veel varianten terugkomen en essentieel zijn voor realistische en effectieve oplossingen binnen het VRP.

2.4.2 VRP-varianten

Zoals gezegd is het vehicle routing problem een fundamenteel logistiek probleem dat zich in de loop der jaren heeft ontwikkeld om realistische scenario's te omvatten. Verschillende varianten van het VRP zijn ontstaan om specifieke beperkingen en operationele aspecten aan te pakken, zoals capaciteitsbeperkingen, tijdvensters, dynamische gegevens en duurzaamheid. Hieronder worden enkele varianten van het VRP bondig beschreven. Dit zijn concepten die vaak terugkomen in de literatuur en waarop steeds verder gebouwd wordt om verder te ontwikkelen. Bij deze literatuurstudie wordt ingezoomd op varianten die nuttig zijn binnen e-commerce, maar niet op hun doelfunctie en beperkingen. Dit gebeurt wel bij de sectie over het VRPD.

Het Capacitated VRP (CVRP) is één van de bekendste varianten van het VRP. Hierbij hebben voertuigen een maximale laadcapaciteit, waarbij de totale vraag van de klanten op een route deze capaciteit niet mag overschrijden. Dit probleem werd uitgebreid onderzocht door Laporte et al. (1983), die exacte en heuristische methoden zoals branch-and-cut en heuristische methoden zoals een savings-algoritmen ontwikkelde om routes efficiënt te verdelen. Beperkingen in het CVRP van Laporte omvatten niet alleen de voertuigcapaciteit, maar ook de veronderstelling van homogene voertuigen en statische vraag, wat in de praktijk vaak niet realistisch is. Toekomstig onderzoek richt zich op de integratie van heterogene vloten en het modelleren van onzekerheden in de vraag, zoals variabele klantorders, om het model beter af te stemmen op real-world scenario's.

Het VRP with Time Windows (VRPTW) is ook een variant die toepasselijk is in de realiteit. Dit model vereist dat klanten binnen specifieke tijdvensters worden bediend. Dit is cruciaal is voor toepassingen binnen de e-commerce sector. De onderzoekers Gendreau en Tarantilis (2010) benadrukten het belang van het VRPTW in moderne distributie en ontwikkelden metaheuristieken zoals adaptieve large neighborhood search (ALNS) om oplossingen te verbeteren. Toekomstig onderzoek richt zich op het incorporeren van tijdafhankelijke reistijden en het gebruik van machine learning om vertragingen te voorspellen en routes dynamisch aan te passen. Bräysy et al. (2005) leverden eveneens bijdragen door een overzicht te bieden van heuristieken en metaheuristieken voor VRPTW, met nadruk op de balans tussen rekencomplexiteit en oplossingsefficiëntie.

Het Heterogeen Vehicle Routing Problem (HVRP) introduceert een combinatie van voertuigen met verschillende capaciteiten, vaste en variabele kosten, en soms beperkingen qua inzetbaarheid. Dit maakt de routeringsbeslissingen aanzienlijk complexer, maar wel realistischer (Baldacci et al., 2008). Deze variant is bijzonder relevant voor stadslogistiek, omdat vloten vaak bestaan uit een mix van vrachtwagens, bestelwagens, koeriers en elektrische voertuigen. Deze voertuigen hebben elk hun eigen laadcapaciteit, bereik en kostenniveau. Capaciteitsbeperkingen spelen hierbij een centrale rol, aangezien de totale vraag van klanten op een specifieke route de capaciteit van het toegewezen voertuig niet mag overschrijden. Hoewel het klassieke HVRP zich voornamelijk richt op capaciteiten en kostenstructuren, kunnen praktijkgerichte toepassingen ook bijkomende beperkingen bevatten, zoals toegang tot milieuzones of het naleven van tijdvensters. In dat geval spreekt men van uitgebreidere varianten zoals het HVRP met Time Windows (HVRPTW). Zo kunnen varianten

gecombineerd worden, wat zorgt voor een realistischer model in stedelijke omgevingen met strikte leveringsuren en operationele restricties.

Deze varianten doen zich voor in verschillende settings, maar zijn even relevant en realistisch binnen logistieke toepassingen. Het Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP) speelt vooral een rol in distributienetwerken waar voertuigen een beperkte laadcapaciteit hebben, zoals bij leveringen aan supermarkten of winkels. Het VRP met Time Windows (VRPTW) is van belang in tijdkritische sectoren zoals pakketbezorging of maaltijdlevering, waar klanten enkel binnen vooraf gedefinieerde tijdvensters bediend kunnen worden. Deze varianten weerspiegelen elk een andere operationele realiteit, maar dragen allemaal bij aan efficiënte en realistische routeplanning.

Het is dus realistisch om tijdvensters te introduceren, maar er kunnen altijd wijzigingen gebeuren in een route. Zo kunnen er real-time bestellingen of annulaties doorkomen. Het Dynamische VRP (DVRP) behandelt situaties waarin de vraag, en dus de routes veranderen tijdens de uitvoering. Het is dus nodig om constant op de hoogte te zijn van real-time bestellingen en onzekerheden. Pillac et al. (2013) onderzochten dit probleem en introduceerden methoden zoals dynamische programmering en metaheuristieken om routes in real-time aan te passen. Een nadeel van deze variant is de hoge rekencomplexiteit door heroptimalisaties. Hierbij kan AI een rol spelen. Toekomstige onderzoeken focussen op de ontwikkeling van robuustere algoritmen die omgaan met onvolledige data en de integratie van voorspellende modellen om vraagpatronen te herkennen. Ook Toth et al. (2002) benadrukken de opkomst van real-time technologieën zoals GPS en mobiele communicatie. Zij vermelden bijvoorbeeld de noodzaak van technologische ondersteuning, zoals real-time communicatie, voor problemen waarbij routes online worden aangepast. Dit sluit aan bij het onderzoek van de uitdagingen van drones in LMD. Dit bevestigt de uitdaging in verband met data-uitwisseling die besproken werd door Jazairy et al. (2023).

Zoals besproken speelt duurzaamheid een steeds prominentere rol in de maatschappij (Zhang, 2016). In tegenstelling tot de meeste papers, die focussen op het minimaliseren van de kosten of reistijd, verschuift de focus naar het effect op het klimaat. Dit leidde tot de introductie van het Green VRP (GVRP). Dat richt zich op het minimaliseren van de milieu-impact, zoals de CO₂-uitstoot, door routes en voertuiggebruik te optimaliseren. Lin et al. (2014) leverden hierbij bijdragen door modellen te ontwikkelen die emissies kwantificeren en metaheuristieken zoals simulated annealing toe te passen. Vaak wordt er in de modellen een uitstoot per afstand gehanteerd. Op deze manier houdt GVRP rekening met duurzaamheid, wat bijdraagt tot de hedendaagse klimaatuitdagingen en consumentenverwachtingen.

Ten slotte bestaan er ook complexere vormen van het VRP, zoals het Multi-Depot VRP (MDVRP) (Montoya-Torres et al., 2015), het VRP met gesplitste leveringen (VRPSD) (Montoya-Torres et al., 2015), synchronisatieproblemen en reverse logistics zoals het VRP met Pickups and Deliveries (Berbeglia et al., 2007). Hoewel deze varianten zeer relevant zijn voor commerciële leveringen, gaan we hier niet verder op in. Enkel varianten waar rechtstreeks informatie uit werd gehaald voor het onderzoek in het empirisch deel van deze masterproef worden verder besproken. Het erkennen van

het bestaan van deze modellen is echter wel belangrijk. Zo kan aangetoond worden dat veel realistische concepten toegepast kunnen worden in een VRP-model.

Braekers et al. (2016) classificeerden modellen tussen 2009 en 2015, waaronder CVRP, Dynamische VRP (DVRP), en Tijdafhankelijke VRP. In het overzicht in tabel 1 worden enkele VRP-varianten opgelijst, toegelicht en worden enkele auteurs voorzien die over het onderwerp hebben geschreven.

VRP Variant	Beschrijving	Literatuur
Capacitated VRP	Problemen met capaciteitsbeperkingen van voertuigen	Laporte (2009)
Periodieke VRP	Routingproblemen die over meerdere dagen gepland worden	Campbell & Wilson (2014)
VRP met tijdvensters	Problemen met strikte tijdslots voor leveringen	Braysy & Gendreau (2005); Gendreau & Tarantilis (2010)
Dynamische VRP	Problemen waarbij vraag of routes veranderen tijdens de uitvoering	Pillac et al. (2013)
Ophaal- en bezorgingsproblemen	Problemen waarbij de goederen moeten opgehaald worden en geleverd	Berbeglia et al. (2007)
VRP met meerdere depots	Problemen waarbij voertuigen vanuit meerdere depots opereren	Montoya-Torres et al. (2015)
VRP met gesplitste leveringen	Leveringen die over meerdere ritten kunnen worden verdeeld	Archetti & Speranza (2012)
Green VRP	Varianten die gericht zijn op duurzaamheid en emissies minimaliseren	Lin et al. (2014)
Synchronisatie VRP	Problemen waarbij coördinatie tussen meerdere voertuigen vereist is	Drexel (2012)

Tabel 1: Overzicht VRP-varianten

De oplossingsmethoden voor het VRP hebben een lange weg afgelegd. Exacte methoden zoals branch-and-bound, beschreven door Fontes et al. (2006) waren aanvankelijk dominant maar onpraktisch voor grootschalige probleemstellingen vanwege de NP-hardheid. Heuristieken, zoals de Clarke-Wright-aanpak, boden snelle benaderingen, gevolgd door metaheuristieken zoals Tabu Search en genetische algoritmen, waar Cordeau et al. (2012) baanbrekend werk leverde. Zijn methoden worden vaak toegepast in onderzoek met betrekking tot het VRP.

Zo introduceert Cordeau et al. (2012) een parallelle iteratieve tabu-search-heuristiek voor het oplossen van vier varianten van het voertuigroutingsprobleem (VRP): de klassieke VRP, de periodieke VRP (PVRP), de multi-depot VRP (MDVRP) en de locatieafhankelijke VRP (SDVRP), inclusief hun varianten met tijdsvensterbeperkingen (VRPTW, PVRPTW, MDVRPTW, SDVRPTW). De heuristiek combineert tabu-search met een eenvoudige verstoringstechniek binnen een iteratief lokaal zoekkader om een brede verkenning van de zoekruimte te garanderen. Uitgebreide computationele tests tonen aan dat de voorgestelde heuristiek beter presteert dan alleen tabu-zoek en concurrerend is met recente heuristieken die specifiek voor elk probleem zijn ontworpen. Het doel is een eenvoudige, aanpasbare methode die een goede balans biedt tussen oplossingskwaliteit en rekentijd. Deze metaheuristiek is dus zeer waardevol voor toekomstig VRP-onderzoek.

Braekers et al. (2016) benadrukken dat moderne toepassingen met duizenden klanten en voertuigen afhankelijk zijn van heuristieken (bijv. nearest neighbor, insertie) en metaheuristieken (bijv. Simulated Annealing, Ant Colony Optimization) om lokale optima te vermijden en de rekentijd te verminderen. Hybride methoden, zoals branch-and-price van Desaulniers et al. (2002) en machine learning, zoals deep reinforcement learning, verbeteren de snelheid en nauwkeurigheid in dynamische contexten. Deze evolutie weerspiegelt de impact van digitalisering en big data.

2.5 VRPD

2.5.1 Introductie

Het Vehicle Routing Problem with Drones (VRPD) is een uitbreiding van het klassieke Vehicle Routing Problem, waarin vrachtwagens en drones samenwerken om leveringen efficiënter uit te voeren. Dit probleem speelt een grote rol in de moderne logistiek, vooral in het domein van last-mile delivery, waar snelheid en flexibiliteit essentieel zijn om klanten efficiënt te bedienen. Traditioneel gericht op wegtransport, biedt de opkomst van elektrische voertuigen en drones nieuwe uitdagingen en kansen (Wang et al., 2019). Drones worden ook steeds vaker ingezet voor last-mile delivery en beloven snellere leveringen, minder congestie en een lagere ecologische voetafdruk (Campbell et al., 2017). Ze introduceren echter ook hoge complexiteit door de integratie van batterijcapaciteit, regelgeving en weersomstandigheden in de optimalisatieproblemen (Uherek, 2010). De literatuur over het VRPD heeft zich de afgelopen jaren sterk ontwikkeld (Wang et al., 2019), met een focus op het modelleren van de samenwerking tussen vrachtwagens en drones, het aanpakken van operationele beperkingen en het ontwikkelen van varianten die inspelen op specifieke logistieke uitdagingen.

Traditionele distributiesystemen lopen tegen verschillende problemen aan, zoals verkeerscongestie, hoge bezorgkosten en inefficiënte routes. Drones kunnen deze uitdagingen aanpakken door pakketten direct, in vogelvlucht, van distributiecentra naar eindgebruikers te brengen zonder afhankelijk te zijn van wegen en verkeer (Murray, 2015). Dit heeft geleid tot een toenemende interesse in VRPDs, mede door de lagere operationele kosten en potentieel op vlak van duurzaamheid.

Binnen VRPD's zijn er verschillende benaderingen die de samenwerking tussen vrachtwagens en drones mogelijk maken. In volgende sectie wordt een indeling tot drie VRPD-structuren gemaakt. Dit zijn de meest voorkomende structuren die besproken worden in VRPD-onderzoek. Elk van deze structuren is ontworpen om specifieke logistieke uitdagingen aan te pakken en biedt unieke voordelen. Hieronder bespreken we eerst de verschillende mogelijke structuren, gevolgd door een literatuurstudie binnen het VRPD.

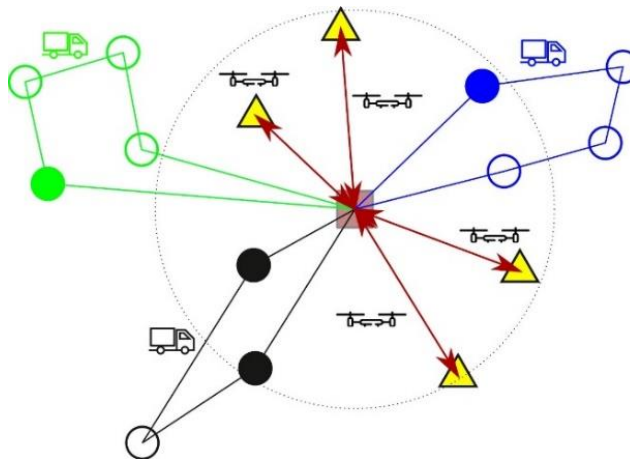
2.5.2 VRPD-structuren

De structuur van het routeringsprobleem is afhankelijk van het type probleem en van de doelstellingen van de onderzoeker. Binnen de literatuur rond logistieke optimalisatie komen verschillende varianten van het klassieke Travelling Salesman Problem (TSP) en het VRPD voor, elk met hun eigen kenmerken en beperkingen. De exacte modellering hangt echter sterk af van de aannames: mogen drones alleen lanceren en landen bij specifieke depots, of ook onderweg? Is er slechts één drone, of zijn er meerdere? Hoe wordt de samenwerking tussen truck en drone gecoördineerd? Deze vragen bepalen de aard van het model en de keuze voor de gebruikte oplossingsmethode. Hieronder gaan we dieper in op de manier waarop dit model structureel wordt opgebouwd.

1. Parallel Drone Routing

Bij Parallel Drone Routing (PDR) opereren drones en vrachtwagens onafhankelijk van elkaar, wat betekent dat ze afzonderlijk hun leveringen uitvoeren zonder onderlinge interactie. Drones vertrekken rechtstreeks vanuit een distributiecentrum en leveren pakketten bij klanten terwijl vrachtwagens tegelijkertijd een andere route afleggen om hetzelfde te doen. Dit model heeft als voordeel dat drones direct van een centraal punt kunnen opereren en niet afhankelijk zijn van vrachtwagens als lanceerplatforms. Hierdoor kunnen leveringen sneller plaatsvinden, vooral in stedelijke gebieden waar verkeerscongestie een groot probleem is. Echter, de batterijduur en laadcapaciteit van drones vormen beperkingen, omdat ze slechts een beperkte afstand kunnen afleggen voordat ze moeten terugkeren voor herlading. De afhankelijkheid van de vrachtwagen is groot bij deze structuur.

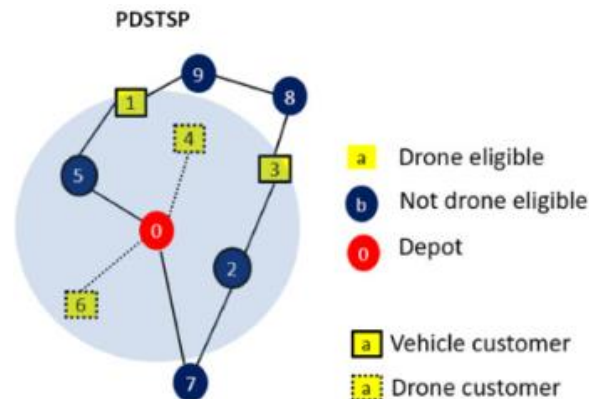
In het Parallel Drone Scheduling VRP (PDSVRP) van Nguyen et al. (2019) wordt parallel drone routing gebruikt. Dit is te zien in figuur 4. Uit de studie blijkt dat de batterijduur van drones een cruciale factor is bij het bepalen welke klanten via drone of truck worden bediend. Door hun beperkte actieradius worden drones vooral ingezet voor nabijgelegen of gunstig gegroepeerde klanten. Klanten die verder weg liggen, worden doorgaans door de truck bediend. Een gevoeligheidsanalyse toont aan dat een grotere batterijcapaciteit leidt tot een grotere inzet van drones en lagere totale kosten. Bij beperkte capaciteit blijven drones beperkt tot korte, efficiënte routes. Dit beïnvloedt direct de route-structuur: soms domineren drones in clusters, in andere gevallen blijft de truck de hoofdvervoerder met drones als aanvulling.



Figuur 4: PDR (Nguyen et al., 2019)

Een gelijkaardige structuur werd opgesteld door Saleu et al. (2022). Zij gebruiken ook een uitbreiding van de standaard voertuig-drone combinatie: er is een vloot van meerdere voertuigen en drones, en in plaats van de totale kosten te minimaliseren, is het doel de makespan te verkorten. Dit minimaliseert de reisduur tot het moment waarop alle voertuigen en drones terugkeren naar het depot. Saleu et al. (2022) verbiedt dat drones enkele eindbestemmingen bezoeken (*not drone eligible*), wat een verschil is ten opzichte van Nguyen et al. (2019). Dit komt ofwel door de beperkte

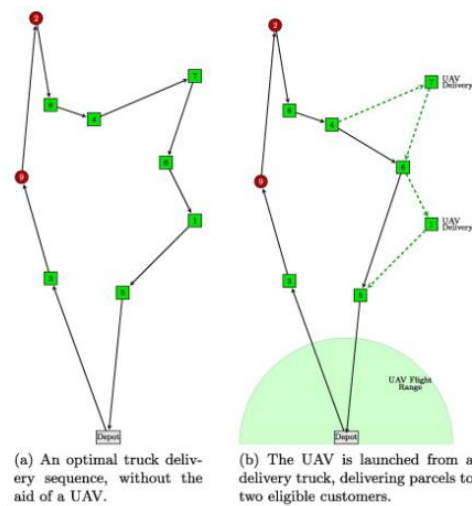
afstand die drones kunnen afleggen, ofwel door de ontoereikende capaciteit van de drone. In hun model bedient elke drone één klant per heen-terugvlucht, terwijl de voertuigen klassieke routes volgen. Ook verschilt ten opzichte van het artikel van Nguyen et al. (2019), waarbij drones trips kunnen maken om meerdere klanten te bedienen. De bevindingen zijn echter zeer gelijkaardig. De batterijcapaciteit speelt weer een belangrijke rol door de afstand die de drone kan afleggen te limiteren.



Figuur 5: PDR (Saleu et al., 2022)

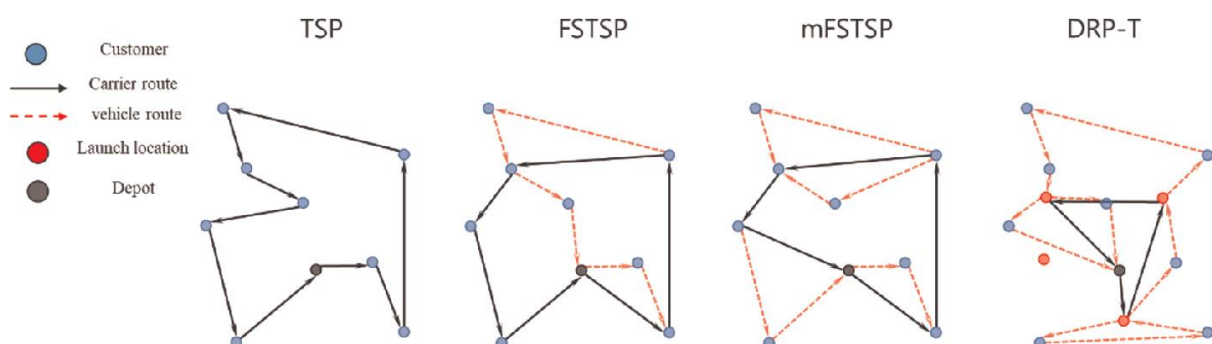
2. Truck-Drone Synergy (TDS)

Een andere veelbelovende VRPD-variant wordt het Truck-Drone Synergy (TDS) model genoemd, waarbij vrachtwagens functioneren als mobiele lanceerplatforms. Murray et al. (2015) pasten deze methode als eerste toe om het Flying Sidekick Traveling Salesman Problem (FSTSP) uit te bouwen. Een verdere uitleg van het FSTSP volgt in de volgende sectie. Bij de TDS-structuur kan een drone vanaf een vrachtwagen opstijgen, een pakket afleveren en vervolgens terugkeren naar dezelfde vrachtwagen om opnieuw ingezet te worden. Dit wordt getoond in figuur 6, waarbij klant één en zeven bediend worden door de drone in plaats van de vrachtwagen. Hierbij moet de vrachtwagen niet op dezelfde locatie staan als bij uitzending. De vrachtwagen kan zelf leveringen maken en rijdt dus door tot het volgend ontmoetingspunt. Dit vermindert de actieradiusbeperkingen die drones normaal gesproken hebben, omdat de vrachtwagen tegelijkertijd voortbeweegt en dicht bij nieuwe klanten kan komen. Het tekort aan batterijcapaciteit kan op deze manier deels opgelost worden. Hierdoor wordt het mogelijk om drones efficiënter te gebruiken zonder lange retourvluchten naar een distributiecentrum. Deze structuur kan toegepast worden in grote streken, maar ook in landelijke gebieden, waar lange afstanden tussen klanten een probleem vormen voor traditionele bezorgmethoden.



Figuur 6: FSTSP (Murray et al., 2015)

Dolgui et al. (2021) stelde een soortgelijk model voor, waarbij drones centraal staan als voornaamste bezorgmethode. In hun model vervoert de truck de drones naar een vaste parkeerlocatie (of satelliet) en bedient de truck nooit zelf de klanten. De drones voorzien de leveringen, rekening houdend met hun beperkte batterijduur. Dit is verschillend van het model van Murray et al. (2015), waarbij de vrachtwagens wel zelf leveringen uitvoeren. Deze masterproef stelt een soortgelijk VRPD voor. Het enige verschil met het model van Dolgui et al. (2021) is dat de drones terugkeren naar hetzelfde knooppunt van waar ze vertrokken. Bij het model van Dolgui et al. (2021) is dit een ander knooppunt om zo de efficiëntie te verhogen. Figuur 7 toont dat de vrachtwagenroute vast ligt en dat enkel de drone klanten kan bedienen. Er is ook een vrachtwagenknooppunt dat niet bezocht wordt door de vrachtwagen, aangezien dit niet de optimale route zou zijn. Een ander verschil met het model van Murray et al. (2015) is dat Dolgui meerdere klanten per dronevlucht toelaat. Dit concept wordt 'multiple visits' genoemd, en zal gebruikt worden in het praktijkgedeelte van deze masterproef.



Figuur 7: Structuur Dolgui et al. (2021)

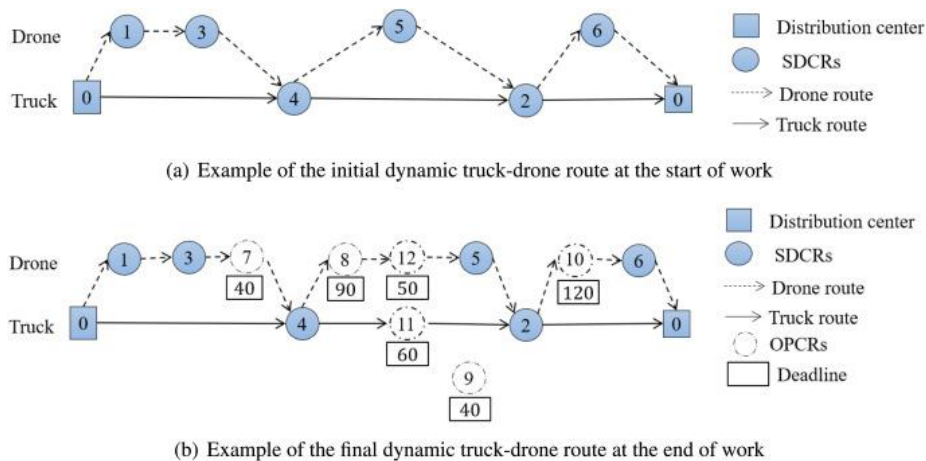
Deze structuur lijkt op een Two-Echelon VRPD waarbij de distributie in twee niveaus wordt gesplitst (Breunig, 2019). Bij Dolgui et al. (2021) zien we een vergelijkbare opzet: de vrachtwagen fungeert als mobiel depot dat de drones naar vaste parkeerlocaties brengt, zonder zelf rechtstreeks klanten te bedienen. De drones vormen het tweede echelon door de leveringen van deze satellieten naar de

klanten te verzorgen. Hierdoor ontstaat een duidelijke scheiding tussen de niveaus, wat efficiëntie en flexibiliteit in het distributieproces mogelijk maakt.

3. Dynamische Drone Dispatching

Dynamische Drone Dispatching is een geavanceerde VRPD-variant waarbij drones niet een vooraf bepaalde route volgen, maar zich kunnen aanpassen aan real-time orders en omstandigheden. Dit betekent dat een drone tijdens het uitvoeren van een levering kan worden omgeleid naar een nieuwe bestemming als gevolg van een bestelwijziging, verkeersvertragingen of weersveranderingen. Dit model vereist een zekere integratie met artificiële intelligentie, zodat de drone autonoom beslissingen kan nemen op basis van actuele data. Hierdoor kunnen leveringen verder worden geoptimaliseerd, met minimale menselijke interventie. Door de flexibiliteit is het zeer relevant voor last-mile deliveries in de e-commerce sector.

Het artikel van Gu (2023) beschrijft zo een geavanceerd en dynamisch model voor truck-drone operaties waarin zowel vooraf geplande leveringen als on-demand ophaalverzoeken worden verwerkt, met strikte tijdsgerelateerde beperkingen. In dit model, dat de het "Dynamic Truck-Drone Routing Problem for Scheduled Deliveries and on-demand Pickup" wordt genoemd, is er één vrachtwagen die uitgerust wordt met één drone. De drone kan meerdere klanten in één vlucht bedienen (mits de capaciteit- en batterijbeperkingen dit toelaten) en de vrachtwagen fungeert als mobiele basis maar voert ook zelfstandig diensten uit wanneer nodig. Het systeem is dynamisch omdat on-demand aanvragen tijdens het traject binnenkomen en de route continu moet worden aangepast. De onderzoekers beschrijven het probleem als een beslissingsproces waarbij steeds keuzes gemaakt moeten worden. Ze bedenken een oplossing met twee belangrijke onderdelen: eerst een methode om vooraf een goede route te maken, en daarna een snelle aanpak die tijdens het rijden de route aanpast zodra er nieuwe ophaalverzoeken binnenkomen. In dit systeem werken geplande leveringen en onverwachte ophaalopdrachten samen, waarbij de samenwerking tussen vrachtwagen en drone goed geregeld wordt.



Figuur 8: D-TDRP-SDOP (Gu, 2023)

2.5.3 Evolutie en uitbreidingen van het VRPD

De uiteenlopende structuren van VRPD-modellen laten zien hoe flexibel en veelzijdig dit onderzoeksgebied is. Om het volledige plaatje te begrijpen, is het daarnaast essentieel om stil te staan bij de evolutionaire stappen die tot deze modellen hebben geleid. In de volgende sectie wordt daarom ingegaan op de belangrijkste ontwikkelingen en uitbreidingen van het VRPD. Hierna worden enkele concepten toegelicht die gebruikt zullen worden voor het empirisch deel van de masterproef.

Een van de eerste concepten die bijdraagt aan het Vehicle Routing Problem with Drones (VRPD) kwam van Murray et al. (2015), die het Flying Sidekick Traveling Salesman Problem (FSTSP) introduceerden, wat zoals vermeld een structuur heeft van truck-drone synergie. Dit model legde de basis voor het concept van vrachtwagen-drone samenwerking. In de FSTSP fungeert de vrachtwagen als een mobiele basis, terwijl de drone leveringen uitvoert naar nabijgelegen klanten binnen een beperkte actieradius. Het model introduceerde belangrijke beperkingen zoals de batterijcapaciteit en het laadvermogen van de drone, die essentieel zijn voor realistische toepassingen. De vrachtwagen en drone werken synchroon, waarbij de drone terugkeert naar de vrachtwagen om batterijen te wisselen of nieuwe pakketten op te halen. Dit model vormde een fundament voor latere studies in vrachtwagen-drone logistiek. Later breidde Murray zijn model nog uit tot het Multiple Flying Sidekicks Traveling Salesman Problem (mFSTSP), een uitbreiding van het originele FSTSP-model, waarbij meerdere drones per vrachtwagen worden ingezet (Murray et al., 2020). Dit maakt het een gespecialiseerde variant binnen het VRPD-domein.

De introductie van het FSTSP door Murray et al. (2015) markeerde een belangrijke stap in de evolutie van VRPD, maar beide modellen vertonen fundamentele verschillen in scope en toepassing. Terwijl VRPD een algemene uitbreiding is van het klassieke VRP en vaak meerdere vrachtwagens en drones omvat, richt het FSTSP van Murray et al. (2015) zich specifiek op één vrachtwagen en één drone, met vaak als doel om de totale voltooiingstijd (makespan) te minimaliseren. In sommige studies wordt de doelfunctie echter aangepast naar andere criteria, zoals kosten of energie, afhankelijk van de onderzoeksfocus. De doelstelling is dus zeker niet hetzelfde voor alle FSTSP-modellen. Tabel 2 geeft de een overzicht van de eigenschappen van een VRPD-model en een FSTSP model, zodat de verschillen zichtbaar worden.

Aspect	VRPD	FSTSP
Aantal voertuigen	Meestal meerdere vrachtwagens en drones, maar kan ook 1 vrachtwagen en 1 drone zijn.	Altijd 1 vrachtwagen en 1 drone.
Doelstelling	Flexibel: kan totale kosten, reistijd, of andere maatstaven minimaliseren.	Specifiek: Minimaliseert totale voltooiingstijd. Kan ook flexibel zijn (varianten).
Synchronisatie	Synchronisatie tussen vrachtwagens en drones is belangrijk, maar flexibeler (bijv. drones kunnen terugkeren naar andere nodes).	Strenge synchronisatie: de drone moet altijd terugkeren naar de vrachtwagennode van waar hij vertrok.
Complexiteit	Algemener en complexer, kan meerdere depots, vrachtwagens, en klanttoewijzingen omvatten.	Specifiek en eenvoudiger door focus op 1 vrachtwagen en 1 drone.
Flexibiliteit drones	Drones kunnen meerdere klanten per lus bedienen	Drone bedient slechts 1 klant per trip. (Varianten bestaan)

Tabel 2: VRPD vs FSTSP

In VRPD zijn de doelstellingen flexibel en kunnen variëren van het minimaliseren van kosten of reistijd tot het maximaliseren van de klantwaarde. Een ander verschil ligt in de synchronisatie: FSTSP bevat strenge synchronisatie, waarbij de drone altijd terugkeert naar het vrachtwagenknooppunt van waar hij vertrok om een klant te bedienen. Bij VRPD is dit flexibeler door drones meerdere klanten per trip te laten bedienen en terug te keren naar een andere stationaire node.

Karak et al. (2019) bouwden voort op dit werk met de introductie van het Hybrid Vehicle-Drone Routing Problem (HVDRP). Dit model breidde het concept van de FSTSP uit door meerdere drones per vrachtwagen toe te staan en een flexibelere samenwerking tussen vrachtwagens en drones mogelijk te maken. Hierdoor valt het onder de noemer van VRPD. In het HVDRP kan de vrachtwagen nog steeds fungeren als een mobiel depot, maar het model houdt ook rekening met complexere scenario's, zoals meerdere leveringen per dronevlucht en geoptimaliseerde routes voor zowel vrachtwagens als drones. Het HVDRP richt zich op het minimaliseren van de totale levertijd en kosten, terwijl het de beperkingen van drones, zoals actieradius en batterijduur, respecteert. Beide modellen hebben significante invloed gehad op de ontwikkeling van VRPD. De FSTSP benadrukte de basisprincipes van vrachtwagen-drone samenwerking, terwijl het HVDRP verdere verfijning en schaalbaarheid toevoegde, waardoor het beter geschikt is voor grootschalige logistieke toepassingen.

Om in te spelen op de opkomende VRPD-modellen, hanteren veel onderzoeken de cluster-first, route-second methode (Gu, 2023). Dit een benadering veel gebruikt wordt om de route van de voertuigen te bepalen. In deze aanpak wordt eerst de optimale vrachtwagenroute bepaald, waarbij klanten worden gegroepeerd voor optimale leveringen. Op basis van die clusters worden er centrale punten gekozen die de vrachtwagenknooppunten voorstellen. Per cluster bedient de drone alle klanten. Deze aanpak minimaliseerde het gebruik van de vrachtwagen en verhoogde de efficiëntie van drones aanzienlijk.

2.5.3.1 Toegepaste concepten en beperkingen

De VRPD-structuur (Vehicle Routing Problem with Drones) heeft impact op de beperkingen binnen een VRPD-model omdat het meerdere voertuigen en drones combineert, wat complexe synchronisatiebeperkingen oplegt, zoals de noodzaak voor drones om te worden geladen, opgeladen of terug te keren naar vrachtwagens of depots, met bijbehorende tijds- en capaciteitslimieten. Daarnaast introduceert de flexibiliteit van drones, die zelfstandig kunnen opereren of variëren in start- en eindpunten zoals mobiele depots of stationaire nodes, dynamische beperkingen zoals batterijduur en coördinatie met vrachtwagens. Tot slot verhoogt de complexe optimalisatie, door de combinatie van routeplanning voor vrachtwagens en drones plus variabele drone-taken zoals meerdere klanten per trip, de computationele beperkingen, zoals maximale rekenkracht en tijd om een oplossing te vinden, wat de modellering en oplossingsstrategie aanzienlijk beïnvloedt. In dit onderdeel bespreken we enkele concepten en beperkingen die vaak gebruikt worden in VRPD-

modellen om een realistisch beeld te schetsen, naargelang de onderzoeksfocus. Deze zullen ook toegepast worden in het model in het empirisch deel.

Naast de structuur van het VRPD-model zijn er ook uitbreidingen ontstaan op vlak van de beperkingen die gebruikt worden om het model te formuleren. Bij een eerste uitbreiding werden er capaciteitsbeperkingen gebruikt en ontstond het Capacitated Vehicle Routing Problem with Drones (CVRPD) (Zhu et al., 2021; Nguyen et al., 2019), wat een uitbreiding is op het CVRP van Laporte et al. (1983). Bij dit model werd de noodzaak om zowel de beladingsgraad van vrachtwagens als drones efficiënt te beheren benadrukt. Het doel bij gebruik van dergelijke restricties, is dan ook vaak om de transportkosten te minimaliseren. Dat is relevant voor commerciële toepassingen, waar kostenoptimalisatie een essentiële rol speelt. Het model dat voorgesteld wordt in het empirisch deel zal een vereenvoudigde vorm van een capaciteitsbeperking bevatten.

Voor vrachtwagens wordt doorgaans een maximale laadcapaciteit Q opgelegd. Dit betekent dat de totale vraag van alle klanten op een route de capaciteit van de vrachtwagen niet mag overschrijden. Wiskundig wordt dit vaak voorgesteld als de twee volgende vergelijkingen:

$$\sum_{i \in V} d_i * x_{ij} \leq Q \quad \forall j \in R$$

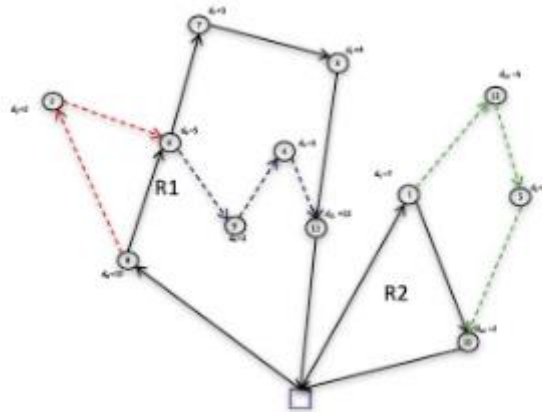
waarbij d_i de vraag is van klant i , x_{ij} een binaire variabele is die aangeeft of er een verbinding is van klant i naar klant j , V een set is van vrachtwagennodes en R de set van routes voor de vrachtwagens. Voor drones geldt een gelijkaardige beperking, zij het met een vaak lagere maximale capaciteit q , die eveneens niet overschreden mag worden:

$$\sum_{i \in D} d_i * y_{ij} \leq q \quad \forall j \in Rd$$

waarbij y_{ij} een binaire variabele is die aanduidt of dronelevering van i naar j plaatsvindt. In een VRPD is dit dus van een vrachtwagenknooppunt naar een klant, of van een klant naar een andere klant. D is hierbij de verzameling klanten en Rd de verzameling routes die door de drone genomen kan worden. De beperking geldt voor elke drone-route j , wat betekent dat de totale capaciteit die door de drone gebruikt wordt over alle klanten i in die route begrensd is door q . Hierbij is q onderdeel van Q aangezien de lading van de drones meegenomen moet worden door de vrachtwagen. Deze capaciteitsbeperkingen zijn cruciaal in het CVRPD omdat ze het mogelijk maken om leveringsstrategieën te ontwikkelen die logistiek haalbaar zijn.

Een verdere uitbreiding aan het klassiek HVDRP werd door Breunig (2019) geïntroduceerd. Dit wordt het Two-Echelon Vehicle Routing Problem with Drones (2EVRPD) genoemd, waarin vrachtwagens en drones samenwerken in een hiërarchische structuur. Deze structuur zal ook gebruikt worden in het model dat voorzien wordt in het empirisch deel van de masterproef. Zoals reeds besproken werken

vrachtwagens en drones in dit model samen binnen een tweeledige distributiestrategie. Hierbij verzorgen vrachtwagens het transport van goederen naar centrale hubs of depots, terwijl drones worden ingezet voor leveringen binnen de nabije omgeving van deze hubs. Het 2EVRPD is met name effectief in stedelijke gebieden met een hoge bevolkingsdichtheid, waar de snelheid en wendbaarheid van drones optimaal benut kunnen worden. Het grootste verschil met eerdere modellen, zoals het FSTSP en PDSTSP, is dat deze modellen geen hiërarchische structuur kennen; zij focussen op directe coördinatie tussen vrachtwagens en drones voor individuele leveringen. Het 2EVRPD daarentegen introduceert een tweede niveau van distributie, wat resulteert in verbeterde schaalbaarheid en flexibiliteit, vooral bij grootschalige leveringen. Dit model vereist echter complexere algoritmen om de coördinatie tussen vrachtwagens, hubs en drones optimaal te beheren, en brengt extra beperkingen zoals clustering van klantlocaties en de noodzaak van efficiënte hublocatiebepaling met zich mee.



Figuur 9: 2EVRPD (Breunig., 2019)

Ten eerste is er bij het 2EVRPD de hiërarchische routebeperking, die ervoor zorgt dat elke klant precies aan één vrachtwagenknooppunt (hub) wordt toegewezen, en dus niet rechtstreeks vanuit het centrale depot mag worden bediend. Dit wordt wiskundig uitgedrukt als:

$$\sum_{h \in H} z_{ih} = 1 \quad \forall i \in C$$

waarbij z_{ih} een binaire variabele is die gelijk is aan 1 als klant i wordt toegewezen aan hub h , H de verzameling hubs is, en C de verzameling klanten.

Voor het gebruikte model in het empirisch deel werd er inspiratie gehaald uit de tweeledige structuur van het 2EVRPD. Hierbij wordt de route die de vrachtwagen zal nemen bepaald door de knooppunten van waar de drone vertrekt om de klanten te bedienen. Zo worden knooppunten, die niet gebruikt worden door de drone, en dus ook niet door de vrachtwagen, vermeden. Dit zorgt voor tijdsbesparing en een efficiëntere route maar ook voor een extra complexiteit. De klanten worden in het

voorgestelde model toegewezen aan één vrachtwagenknooppunt en mogen dus éénmaal bezocht worden.

In stedelijke logistiek spelen verkeersomstandigheden en tijdsvensters voor leveringen een cruciale rol. Tijdsvensters moeten gerespecteerd worden zodat de rit tijdig afgerond is en de vrachtwagenchauffeur geen overuren moet maken. Dit leidt tot een volgende uitbreiding van het VRPD. Tijdsafhankelijke modellen, zoals die van Wang et al. (2019) leggen de nadruk op dynamische factoren die de optimalisatie van bezorgroutes beïnvloeden. Het model van Wang et al. (2019) integreert deze variabelen in de routeplanning voor vrachtwagens en drones, waardoor leveringsbeslissingen kunnen worden aangepast aan real-time informatie. Dit maakt het mogelijk om bijvoorbeeld vrachtwagens om te leiden bij verkeersopstoppen.

Het VRPD met tijdsvensters (VRPD-TW) richt zich op de coördinatie van leveringen binnen vooraf gedefinieerde tijdsintervallen. Elke klant i heeft een toegestaan tijdsvenster waarbinnen de levering moet plaatsvinden. De aankomsttijd t_i bij elke klant moet dan voldoen aan:

$$e_i \leq t_i \leq l_i \quad \forall i \in C$$

Waarbij e_i de openingstijd is van het tijdvenster en l_i de sluitingstijd van het tijdvenster voor klant i , oftewel de laatste tijd waarop de service moet zijn gestart. Deze beperking waarborgt dat leveringen gebeuren binnen klantverwachtingen of contractuele afspraken, wat essentieel is voor klanttevredenheid en naleving van service levels. Daarnaast moet ook de volgorde van bezoeken logisch zijn en rekening houden met reistijd en servicetijd. Dit gebeurt via een temporele opvolgingsbeperking, waarin wordt gesteld dat de aankomsttijd bij klant j ten minste gelijk moet zijn aan de vertrektijd bij klant i plus de reistijd t_{ij} tussen beide:

$$t_j \geq t_i + s_i + t_{ij} - M(1 - x_{ij}) \quad \forall i, j \in C$$

Hierin staat s_i voor de servicetijd bij klant i , en M is een grote constante (big-M) die de beperking enkel activeert wanneer de route van i naar j effectief wordt gevolgd (d.w.z. wanneer $x_{ij} = 1$). Indien drones en vrachtwagens gesynchroniseerd moeten zijn, bijvoorbeeld wanneer een drone moet worden opgehaald na een levering, wordt vaak een bijkomende synchronisatiebeperking toegevoegd. Deze garandeert dat de drone zijn missie kan beëindigen en tijdig terugkeert naar een ophaallocatie waar de vrachtwagen aanwezig is:

$$t_{\text{drone}} + \text{return}_{\text{time}} \leq t_{\text{truck}}$$

De tijd waarop de drone klant bedient (t_{drone}) plus de tijd die nodig is om terug te keren naar de vrachtwagen ($\text{return}_{\text{time}}$) niet later mag zijn dan de aankomsttijd van de vrachtwagen bij k (t_{truck}).

Hiermee wordt verzekerd dat de vrachtwagen de drone op het juiste moment kan oppikken, zonder onnodige wachttijd. Kuo et al. (2022) gebruikt soortgelijke tijdvensters. Hun harde tijdvensters in het VRPTWD-model vereisen dat klanten binnen een strikt tijdsinterval $[a_i, e_i]$ worden bediend. Hierbij is a_i de openingstijd van het tijdvenster en e_i de sluitingstijd van het tijdvenster voor klant i . Aankomst vóór a_i veroorzaakt wachttijd, binnen $[a_i, e_i]$ is ideaal, en na e_i maakt de oplossing ongeldig. In het empirisch deel wordt een tijdvenster geplaatst voor de gehele route, zodat als de reisduur langer is dan de toegelaten duur, dan is de oplossing ongeldig.

Door de groeiende klimaatuitdagingen wint duurzaamheid aan belang binnen logistiek. Het Green VRPD combineert elektrische vrachtwagens met drones als emissievrije transportmiddelen voor last-mile bezorging. Dit model streeft naar minimale CO₂-uitstoot en operationele kosten, ondersteund door hernieuwbare energiebronnen zoals zonne-energie. Studies, zoals die van Liu et al. (2022) en Wang et al. (2019), en initiatieven zoals Amazon Prime Air en DHL Parcelcopter tonen het potentieel van deze aanpak, zeker in stedelijke milieuzones. Europese regelgeving en technologische vooruitgang versterken dit nog verder. In het empirisch deel van deze masterproef wordt de totale reisduur geminimaliseerd met behulp van drones. Zoals besproken leidt het gebruik van drones tot een lagere CO₂-uitstoot, wat bijdraagt aan de klimaatdoelstellingen.

2.5.4 Modellering van een VRPD

Naast de verscheidenheid aan uitbreidingen op het VRPD en de verschillende structuren, zijn er ook verschillen bij de opbouw in de formuleren van het VRPD-model. In deze sectie wordt ingezoomd op de verschillende doelfuncties en frequent gebruikte beperkingen binnen het VRPD.

2.5.4.1 Doelfunctie

Bij het VRPD, in context van LMD, zijn er verschillende soorten doelfuncties die variëren afhankelijk van de toepassing en de aard van de beperkingen in het probleem. De doelfunctie wordt gekozen op basis van het doel van het probleem. De doelfunctie, in combinatie met de gerespecteerde beperkingen, geeft de meest optimale waarde voor een gekozen parameter zoals kostenminimalisatie, tijdoptimalisatie of zelfs maximale klanttevredenheid. Hieronder worden de belangrijkste soorten doelfuncties uitgelegd die vaak voorkomen in dit type problemen, inclusief de bijbehorende uitleg en de verschillen tussen de modellen.

A) Minimalisatie van de totale afstand

Wanneer het doel van het lineair programmeringsmodel is om de samengetelde afstand van de drone en de vrachtwagen te minimaliseren, wordt deze doelfunctie (1) gebruikt. Dit is tevens de meest voorkomende doelfunctie in het klassieke VRP, waarbij geen drones gebruikt worden. In dat geval valt de tweede term van vergelijking (1) weg. Deze doelfunctie helpt om brandstofverbruik of energieverbruik te verlagen, wat belangrijk is in context van LMD.

$$\text{Min } Z = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} d_{ij} x_{ij} + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} d_{ij}^k y_{ij}^k \quad (1)$$

Het model probeert dan de afgelegde afstanden van beide voertuigen te minimaliseren. V stelt een set van knooppunten voor van depots en klanten en D een set van drones. d_{ij} is de afstand van node i tot j voor de truck en x_{ij} een binaire variabele gelijk aan 1 als de weg van i naar j genomen wordt. Voor de drone geldt dezelfde redenering. d_{ij}^k is de afstand tussen node i en j voor de drone en y_{ij}^k is de binaire variabele gelijk aan 1 als de drone de weg neemt. Wanneer er meerdere drones gebruikt worden moet er een extra sommatie toegevoegd worden over de set van drones.

B) Minimalisatie van de totale reistijd (makespan vs reistijd)

Wanneer het VRP uitgebreid wordt met drones tot het VRPD wordt er in plaats van naar de afgelegde afstand vaker gekeken naar de totale tijd die de rit heeft ingenomen. Dit komt doordat de afgelegde afstand niet consistent tussen beide voertuigen, door de verschillende snelheden. Er zijn er twee mogelijke benaderingen, namelijk het minimaliseren van de makespan of de reistijd. De minimalisatie van de reistijd is namelijk niet gelijk aan de minimalisatie van de afstand door het gebruik van verschillende snelheden van de drone en truck.

Wanneer de focus ligt op makespan, wordt er geprobeerd om de totale tijd te minimaliseren die nodig was om alle leveringen uit te voeren. Het minimaliseren van de makespan houdt rekening met alle aspecten van de route, inclusief laadtijden, wachttijden en extra taken die behoren tot de synchronisatie van drone en vrachtwagen. Het is dus de tijdsduur vanaf het moment dat het eerste voertuig vertrekt totdat het laatste voertuig zijn rit heeft voltooid.

In modellen die drones gebruiken, is de synchronisatie van de tijd tussen truck en drone een belangrijk aspect. Er kan een doelstelling zijn die niet alleen de totale reistijd minimaliseert, maar ook de tijd die nodig is om de dronebewegingen te synchroniseren met de truckbewegingen, vooral wanneer ze elkaar ontmoeten voor een rendez-vous of het ophalen van de drone. Vooral in situaties waarin voertuigen op elkaar moeten wachten of waarbij een depot op een bepaald moment moet sluiten, is het belangrijk om wachttijden mee te nemen in de berekening. Murray et al. (2015) en Ponza (2015) en focussen in hun modellen op de minimalisatie van de makespan.

Zij gebruiken de volgende doelfunctie (2) , wat simpelweg de laatste tijd waarop een vrachtwagen of een drone arriveert bij het einddepot:

$$\text{Min } t_{c+1} \quad (2)$$

Het is belangrijk om wachttijden, bijvoorbeeld voor onderhoud, te minimaliseren door slimme routeplanning, bijvoorbeeld door klanten met korte servicevensters eerder te bedienen of door meerdere leveringen efficiënt te combineren. Een batterijwissel (Ahmad et al., 2020) gebruiken is een goede techniek om de wachttijd te minimaliseren bij gebruik van drones.

Wanneer de doelfunctie de totale reistijd minimaliseert, wordt de som van de totale tijden die alle voertuigen afleggen bedoeld. Dat is nuttig wanneer de nadruk ligt op het minimaliseren van operationele kosten, zoals brandstofverbruik, arbeidskost of uitstoot. In dit geval tellen wachttijden niet direct mee, tenzij er kosten zijn verbonden aan stilstand, zoals loonkosten of tijdsbeperkingen van voertuigen. Deze doelfunctie wordt gebruikt in het onderzoek van Carlsson et al. (2018) en is al iets meer complex:

$$\text{Min}_{x_1, \dots, x_n, \sigma \in S_n} \sum_{i=1}^n \max \left\{ \frac{1}{\varphi} (x_{\sigma(i)} - x_{\sigma(i+1)}), \frac{1}{\varphi} (x_{\sigma(i)} - p_{\sigma(i)} \| + \| p_{\sigma(i)} - x_{\sigma(i+1)})) \right\} \quad (3)$$

De term $\| x_{\sigma(i)} - x_{\sigma(i+1)} \|$ vertegenwoordigt de Euclidische afstand die de vrachtwagen aflegt tussen twee opeenvolgende lanceerlocaties, namelijk van $x_{\sigma(i)}$ naar $x_{\sigma(i+1)}$. De term $\| x_{\sigma(i)} - p_{\sigma(i)} \| + \| p_{\sigma(i)} - x_{\sigma(i+1)} \|$ beschrijft de totale Euclidische afstand die de drone aflegt voor een levering. De uitdrukking $\frac{1}{\varphi} \| x_{\sigma(i)} - p_{\sigma(i)} \| + \| p_{\sigma(i)} - x_{\sigma(i+1)} \|$ vertegenwoordigt de tijd die de drone nodig heeft om van de lanceerlocatie naar de klant te vliegen en terug te keren naar de vrachtwagen op de volgende lanceerlocatie, berekend als de totale vliegafstand gedeeld door de snelheid van de drone. De max-operator bepaalt voor elke klant i de langste langste tijd tussen de tijd die de vrachtwagen nodig heeft om naar de volgende lanceerlocatie te rijden en de tijd die de drone nodig heeft om het pakket te bezorgen en terug te keren. Dit weerspiegelt het feit dat de vrachtwagen en drone parallel werken, en de langste van deze twee tijden bepaalt wanneer de volgende levering kan starten. Ten slotte wordt de som genomen over alle klanten, wat de totale reistijd oplevert.

C) Kostenminimalisatie (Routekosten vs operationele kosten)

Bij deze doelfunctie worden de totale kosten van de bezorging geminimaliseerd. Dit totaal is een combinatie van kosten voor brandstoffen, personeel, onderhoud en andere operationele aspecten zoals laadkosten of kosten bij verschillende depots. In een VRPD kunnen de kostenmodellen zeer complex worden omdat drones specifieke kosten meebrengen. Er komen vluchtkosten aan bod die afhankelijk zijn van het gewicht van de lading en de duur van de vlucht. De verschillende modellen moeten dus een balans vinden tussen het inzetten van drones en vrachtwagens om de kosten te verlagen maar toch de efficiëntie van de drone ten opzichte van de vrachtwagen niet te verwaarlozen.

Ook hier kunnen we een onderscheid maken, namelijk routekosten tegenover operationele kosten. Karak et al. (2019) focussen zich op de minimalisatie van operationele kosten. Dit zijn kosten die voortkomen uit het gebruik en onderhoud van drones en voertuigen, onafhankelijk van de gekozen routes. Denk hierbij aan energieverbruik, zoals brandstof voor voertuigen en batterijverbruik voor drones, evenals onderhoudskosten die nodig zijn om beide systemen operationeel te houden. Daarnaast vallen personeelskosten, zoals salarissen voor chauffeurs en drone-operators, en kosten voor software en communicatiesystemen die de samenwerking tussen drones en voertuigen coördineren, ook onder operationele kosten. Het minimaliseren van deze kosten gebeurt door

efficiënter gebruik te maken van betere batterijtechnologie, optimalisatie van onderhoudsschema's en automatisering van processen. Zij gebruiken de volgende doelfunctie:

$$\text{Min } \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} y_{ij} * cv_{ij} + \sum_{j \in N} \sum_{d \in D} \sum_{m \in N} \sum_{l \in N} z_{jdm} * cd_{ml}^d \quad (4)$$

Deze doelfunctie (4) minimaliseert dus de totale operationele kosten voor het multimodale netwerk. De eerste term vertegenwoordigt de operationele kosten van de tour die is samengesteld voor het voertuig om de drones te verzenden en op te halen door de gemiddelde reiskost per weg voor het voertuig te sommeren over de gebruikte wegen en het aantal voertuigen. El Habti (2024) gebruikt 1€/ kW als energiekost voor elektrische vrachtwagens. Het verbruik van de vrachtwagen ligt echter lager dan het verbruik van de drone. De tweede term vertegenwoordigt de operationele kosten van de ritten die de drones maken om alle klanten te bezoeken door de gemiddelde kost per gebruikte weg te sommeren voor het aantal drones.

Hiertegenover staat het model van Gu (2023), dat zich focust op de minimalisatie van de routekosten. Deze zijn direct afhankelijk van de gekozen routes en worden beïnvloed door factoren zoals afstand, reistijd en obstakels onderweg. Langere routes leiden tot een hoger brandstof- en batterijverbruik, terwijl vertragingen door verkeersdruk, wachttijden of drone-restricties extra kosten kunnen veroorzaken. Daarnaast spelen ook luchtvaartregelgeving, tolwegen en toegangsbeperkingen een rol in de totale routekosten. Het minimaliseren van routekosten gebeurt door slimme routeoptimalisatie, zoals het plannen van kortere routes, het vermijden van congestie en het strategisch bepalen van voertuigstops waar drones efficiënt kunnen worden ingezet.

2.5.4.2 Frequent gebruikte beperkingen

In dit deel worden enkele belangrijke beperkingen toegelicht die vaak worden gebruikt in een VRPD-model. Ten eerste zijn er beperkingen die noodzakelijk zijn om de goede werking van het model te verzekeren. Dit zijn beperkingen zoals flowbeperkingen (bijvoorbeeld: vanaf het startpunt mag maar 1 uitgaande trip zijn), subtour-eliminatie, etc. Elk werkend model bevat dit soort beperkingen. Hiernaast zijn er specifieke beperkingen die een toevoeging doen aan het model. In tabel 3 vergelijken we bondig de beperkingen die gebruikt worden door enkele auteurs.

	Doelfunctie	Stroombehoud	Tijdvensters	Capaciteit	Synchronisatie truck-drone	Laadcapaciteit
Murray & Chu	Min reistijd	✓	□	□	□	□
Karak Abdelghany	Min operationele kosten	✓	□	✓	✓	✓
Zhang	Min routekosten	✓	□	✓	✓	✓
Ham	Min reistijd	✓	✓	□	✓	✓
Gu Liu Poon	Min routekosten	✓	✓	✓	✓	✓
Ponza	Min reistijd	✓	✓	✓	✓	✓
Schermer	Min reistijd	✓	✓	✓	✓	✓

Tabel 3: Beperkingen en doelfunctie van onderzoeken

In de tabel staan eerst de auteurs opgelijst met de doelfunctie die ze gebruiken in hun model. Hierna wordt een overzicht gegeven van welke beperkingen ze geïntegreerd hebben in hun model. Nu volgt een kwalitatieve bespreking van de verschillende beperkingen met hun doel en nut:

1. Stroombehoudregels:

Deze regels zijn essentieel om ervoor te zorgen dat vrachtwagens en drones op een logische manier van locatie naar locatie bewegen. Ze helpen voorkomen dat er onmogelijke of verboden routes worden gepland, zoals het verlaten van een locatie zonder dat er een voertuig of drone is aangekomen. Dit garandeert een coherente en uitvoerbare routeplanning met een logische flow. Dit zijn beperkingen die elk model heeft om het model te doen werken.

2. Tijdvensters:

Tijdvensterbeperkingen zorgen ervoor dat bezoeken aan locaties binnen een specifiek tijdsinterval plaatsvinden. Dit kan belangrijk zijn om aan klantafspraken te voldoen, wachttijden te minimaliseren of processen zoals laden en lossen efficiënt te coördineren. Onderstaande beperking wordt gebruikt in Ponza (2015), waarbij de linkerzijde de som is van de aankomsttijd t_i en servicetijd s_i bij een knooppunt i en de reistijd tot knooppunt j . De rechterzijde kan de beperking deactiveren als $y_{ij} = 0$, omdat de weg van i naar j dan niet gebruikt wordt. Anders is de rechterzijde gelijk aan de aankomsttijd bij knooppunt j , t_j . In dat geval moet de aankomsttijd bij knooppunt i kleiner zijn dan de aankomsttijd bij knooppunt j , en moet de vergelijking kloppen.

$$t_i + s_i + \frac{d_{ij}}{v_v} \leq t_j + M(1 - y_{ij})$$

3. Capaciteitsbeperkingen:

Deze beperkingen waarborgen dat voertuigen of drones niet meer goederen vervoeren dan hun laadcapaciteit. Dit is cruciaal voor alle goederen te vervoeren, veiligheid, kostenbeheer en naleving van wettelijke voorschriften over maximaal toegestane belasting. Onderstaande beperking werd gebruikt door Nguyen et al. (2019) om de capaciteit te beperken. Zij kunnen echter meerdere drones en vrachtwagens gebruiken om de klant te bedienen. Zonder deze beperking zou het model een onrealistische route kunnen gebruiken waarbij te veel lading tegelijk wordt meegenomen.

$$\sum_{i \in I} v_i * Y_{cpji} \leq v_{c_c} \quad \forall c \in C, p \in P \cup d, j \in P \cup d$$

Deze som telt het volume van item i , onderdeel van de set goederen I , (v_i) op voor alle goederen. Y_{cpji} is een binaire variabele die aangeeft of item i vervoerd wordt in kader van

klantvraag c , tijdens de route van het voertuig van node p naar j . De beperking zorgt ervoor dat dit totaal niet groter is dan de capaciteit v_{c_c} van het voertuig dat klant c bedient. In gewone taal: de som van de volumes van de items die op een route p naar j worden vervoerd voor klant c , mag niet groter zijn dan de capaciteit van het toegewezen voertuig of drone. In LMD-context is dit een belangrijke restrictie aangezien de hoeveelheid pakketjes dat een drone kan leveren beperkt is. Wanneer meerdere klanten bezocht kunnen worden per dronevlucht wordt dit complexer, maar nog meer relevant.

4. Truck-drone-synchronisatie:

Deze beperkingen helpen bij het coördineren van het samenspel tussen vrachtwagens en drones, zoals het garanderen dat een drone pas op een bepaalde plek kan landen of vertrekken wanneer de vrachtwagen daar aanwezig is. Dit zorgt voor correcte operaties en voorkomt inefficiënties. Ponza (2015) gebruikt volgende beperking om op te leggen dat de drone alleen kan worden gelanceerd of opgehaald als de truck aanwezig is. Hierbij is de aankomsttijd van de vrachtwagen bij knooppunt j , t_j^v , kleiner dan de aankomsttijd van de drone bij knooppunt j , t_j^d .

$$t_j^v \leq t_j^d$$

5. Laadcapaciteit:

Deze beperking houdt de batterijcapaciteit onder controle zodat een drone altijd de trip kan afmaken en nooit zonder batterijcapaciteit zit. Dit is nodig om de optimale en zo groot mogelijke trip te maken. De mogelijke beperkingen die gebruikt kunnen worden om dit te garanderen worden besproken in sectie 2.7 over batterijcapaciteit.

2.5.5 Oplossingsmethoden

Het vinden van oplossingen voor VRPD vereist geavanceerde algoritmes die zowel efficiënt als praktisch zijn. Deze kunnen worden onderverdeeld in exacte oplossingsmethoden, heuristieken en metaheuristieken.

Exacte methoden trachten een optimale oplossing te vinden door gebruik te maken van wiskundige modellen of datastructuren. Voor complexe VRPD-varianten is het gebruik van exacte methoden vaak beperkt tot kleinere probleemomvang vanwege de exponentieel toenemende rekentijd (Xiao et al., 2021). Bekende technieken zijn de Branch-and-Bound-methode, waarbij het probleem wordt opgesplitst in kleinere deelproblemen (branching) en irrelevante oplossingen worden geëlimineerd door stukken van de boom af te sluiten aangezien de oplossing van deze tak nooit optimaal zal zijn door een lage doelfunctiewaarde (bounding) (Kucukoglu et al., 2021). Andere veelgebruikte technieken zijn Dynamic Programming en Mixed Integer Programming, die bijzonder nuttig zijn voor het modelleren van kleine VRPD-problemen met expliciete beperkingen (Erdelic et al., 2019). Een derde techniek, Set Partitioning, wordt toegepast in scenarios waarbij klanten geclusterd worden en

routes binnen clusters afzonderlijk geoptimaliseerd worden (Xiao et al., 2021). Exacte methoden bieden optimale oplossingen bij voldoende rekentijd en worden vaak geïmplementeerd in commerciële tools zoals CPLEX, GUROBI en Lingo.

Voor grotere, complexe VRPD-problemen is het gebruik van heuristieken veel geschikter. Heuristieken streven ernaar om een goede oplossing te vinden binnen een korte tijd, zonder te garanderen dat deze optimaal is. Ze worden vaak onderverdeeld in constructieve heuristieken en verbeteringsheuristieken. Constructieve heuristieken bouwen een oplossing stap voor stap op en omvatten methoden zoals de Modified Clarke and Wright Savings Method, waarbij routes worden gecreëerd en kostenefficiënt samengevoegd (Erdelic et al., 2019), en het Sweep Algorithm, dat klanten op basis van een cirkelvormige ordening toevoegt aan routes. Andere technieken, zoals Cluster-First Route-Second, maken gebruik van clusteringalgoritmes zoals het Density-based Clustering Algorithm om klanten te verdelen over clusters die vervolgens afzonderlijk worden opgelost. Verbeteringsheuristieken beginnen daarentegen vanuit een haalbare oplossing en optimaliseren deze iteratief door gebruik te maken van neighborhood operatoren, wat vaak leidt tot verbetering binnen lokale zoekruimtes (Xiao et al., 2021).

Metaheuristieken vormen een geavanceerde categorie en zijn niet probleem-specifiek. Ze bieden flexibele strategieën om de zoektocht naar oplossingen te structureren en kunnen bijzonder effectief zijn voor complexe VRPD-scenario's (Elshaer et al. 2020). Neighborhood Oriented Metaheuristieken, zoals Simulated Annealing, verhogen de kans op het accepteren van minder goede oplossingen, waardoor lokale optima vermeden worden. Een ander voorbeeld is Tabu Search, dat geheugen gebruikt om herhaling te vermijden door tijdelijk verboden bewegingen op te slaan in een tabu-lijst. Adaptive Large Neighborhood Search combineert vernietigings- en reparatieprocedures om diversiteit in de zoektocht te vergroten en wordt vaak ingezet bij drone-logistiek (Erdelic et al., 2019).

Binnen de groep van metaheuristieken worden ook populatiegebaseerde metaheuristieken toegepast, waarbij natuurlijke selectie wordt gesimuleerd. Genetische algoritmes, Ant Colony Optimization (ACO) en Particle Swarm Optimization (PSO) behoren tot deze categorie. Genetische algoritmes simuleren evolutie door mutatie en crossover toe te passen, terwijl ACO gebruik maakt van feromoonsporen om betere routes te identificeren. PSO optimaliseert door de fysieke bewegingen van zwermen te modelleren (Erdelic et al., 2019).

Een combinatie van exacte methoden met heuristieken of metaheuristieken kan zeer effectief zijn. Exacte methoden bieden nauwkeurige benchmarks, terwijl metaheuristieken zorgen voor flexibiliteit bij complexere en dynamische problemen. Voor VRPD zijn metaheuristieken zoals ALNS en genetische algoritmes bijzonder nuttig volgens Elshaer et al. (2020) vanwege hun vermogen om beperkingen zoals batterijduur en actieradius efficiënt te modelleren.

Hoewel exacte methoden ideaal zijn voor kleine instances, bieden heuristieken en metaheuristieken flexibiliteit en schaalbaarheid voor real-life toepassingen. De keuze voor een oplossingsmethode

hangt af van de omvang en complexiteit van het probleem, de gewenste nauwkeurigheid en de rekentijd die beschikbaar is. Door het combineren van technieken kunnen drone-logistieke systemen significant verbeterd worden, waardoor innovatieve oplossingen binnen VRPD mogelijk worden.

2.6 Een vergelijkingsanalyse van de operationele kosten

In deze sectie wordt een vergelijking van de operationele kosten bestudeerd tussen het gebruik van enkel traditionele voertuigen en het leveren met behulp van vrachtwagens en drones. Deze laatste wordt opgesplitst in twee aspecten, waarbij de drone meerdere klanten kan bezoeken in één vlucht (Multiple visits) tegenover één klanten per vlucht (Single Visit).

Zhang et al. (2023) introduceert het een VRPD-model dat zowel leveringen als ophalingen door vrachtwagens en drones combineert. Het valt onder een "Dynamic VRPD", waarbij de omstandigheden tijdens het uitvoeren van de route kunnen veranderen. In plaats van vaste gegevens, zoals klantlocaties en vraag, kunnen er dynamische factoren optreden, zoals wijzigende klantlocaties, weersomstandigheden of planningsaanpassingen.

Hun studie richt zich op het vergelijken van de operationele kosten van drones met traditionele voertuigen, zowel voor scenario's waarin drones slechts één klant per vlucht bedienen als voor scenario's waarin meerdere klanten worden gecombineerd in één route. De bevindingen tonen aan dat drones, wanneer ze meerdere klanten per vlucht bedienen, aanzienlijk lagere operationele kosten genereren in vergelijking met traditionele voertuigen, vooral in stedelijke gebieden met korte afstanden en hoge klant dichtheid. Dit komt door de flexibiliteit en snelheid van drones, gecombineerd met lagere energiekosten in vergelijking met voertuigen die afhankelijk zijn van fossiele brandstoffen. Echter, in scenario's met langere afstanden of beperkte laadcapaciteit van drones, blijven traditionele voertuigen kostenefficiënter.

Tabel 4 wordt gegeven door Zhang et al. (2023) om het verschil in kosten per kilometer tussen de volgende modellen te onderzoeken. In de tabel staat per leveringsstructuur de totale afstand opgelijst tegenover de totale operationele kost voor de gebruikte route. Het doel van het onderzoek is het aantonen van de operationele kostenverschillen tussen volgende levermethoden:

- **T-mode:** Enkel vrachtwagens bedienen de klanten. (Traditioneel VRP)
- **SV-mode:** Vrachtwagens en drones werken samen, waarbij elke drone slechts één klant bedient per vlucht. (Single-visit)
- **MV-mode:** Vrachtwagens en drones werken samen, waarbij elke drone meerdere klanten bedient per vlucht. (Multi-visit)

Traditioneel		Single visit		Multiple visit	
Afstand (km)	Kost (\$)	Afstand (km)	Kost (\$)	Afstand (km)	Kost (\$)
738	578	746	571	828	565
802	625	826	626	794	530
810	632	815	606	830	535
746	582	767	583	783	547
766	597	807	600	758	498
Totale afstand	Totale kost	Totale afstand	Totale kost	Totale afstand	Totale kost
3862	3014	3961	2986	3993	2675
Kost per km		Kost per km		Kost per km	
0,78 \$/km		0,75 \$/km		0,67 \$/km	

Tabel 4: Operationele kostenverschillen Traditioneel vs SV & MV (Zhang, 2023)

Wanneer de gemiddelde kost per kilometer wordt berekend, kan een interessante vergelijking gemaakt worden. Voor deze drie varianten bedraagt gemiddelde de kost per kilometer respectievelijk €0.78, €0.75 en €0.67. Dit toont aan dat wanneer drones meerdere klanten bezoeken in één trip, dit het voordeligste is volgens Zhang (2023). Hun bevindingen toonden dat drones die meerdere klanten per vlucht bedienen, de operationele kosten met gemiddeld 10-15% kunnen verlagen in stedelijke gebieden met hoge klant dichtheid. Dit voordeel wordt toegeschreven aan de lagere energiekosten van drones en hun vermogen om in directe routes te vliegen, wat tijd en brandstof bespaart. Daarentegen bleken drones die slechts één klant per vlucht bedienen gemiddeld slechts 2-5% goedkoper te zijn dan traditionele voertuigen, voornamelijk door de hogere frequentie van batterijwissels en de beperkte laadcapaciteit.

Andere studies deden soortgelijk onderzoek en ondersteunen deze bevindingen. Chiang et al. (2019) onderzochten het verschil van de routekosten met en zonder gebruik van drones. Hun onderzoek test een opstelling met 200 tot 500 klanten. De besparing in routekosten varieerde hierbij van 25% tot wel 40%. Poikonen et al. (2017) onderzochten de efficiëntie van drones in vergelijking met vrachtwagens in het Parallel Drone Scheduling Traveling Salesman Problem (PDSTSP). Hun bevindingen benadrukken dat drones kosteneffectief zijn voor korte afstanden en in situaties waarin tijdsbeperkingen een cruciale rol spelen. Ze rapporteerden een kostenbesparing van ongeveer 25 bij gebruik van drones ten opzichte van vrachtwagens. Echter, de beperkte batterijcapaciteit en actieradius van drones vormen een uitdaging voor grootschalige implementatie.

Ook Ha et al. (2018) toonden aan dat drones in combinatie met vrachtwagens de operationele kosten kunnen verlagen. Ha et al. (2018) rapporteerde een besparing van 10-25% en benadrukte dat drones vooral voordelig zijn in stedelijke zones, waar ze sneller kunnen leveren dan vrachtwagens door de congestie bij wegverkeer. Uiteraard verlaagt dit de kosten door een optimale tijdsindeling.

Het artikel van Gu et al. (2023) stelt dat de samenwerking tussen drones en vrachtwagens resulteert in een 15% hogere winst en een meer dan 50% hogere acceptatiegraad van on-demand verzoeken. Dit komt doordat het dynamische model de mogelijkheid biedt om on-demand klantverzoeken onderweg te accepteren en efficiënt in de route in te passen, wat de operationele prestaties verbetert.

Naast de genoemde studies zijn er andere relevante bijdragen aan dit onderwerp. Murray et al. (2020) onderzochten het Multiple Flying Sidekicks Traveling Salesman Problem (mFSTSP), een uitbreiding van het originele FSTSP-model, waarbij meerdere drones per vrachtwagen worden ingezet. Ze rapporteerden een kostenbesparing van ongeveer 20% in scenario's met hoge klantichtheid, vooral wanneer drones meerdere pakketten tegelijk kunnen leveren.

In tabel 5 wordt een duidelijk overzicht gegeven over de berekende kostenbesparing van het gebruik van single-visit of multiple-visit ten opzichte van traditionele levermethoden door verschillende onderzoeken. Hierbij worden het gebruikte VRPD-concept en de specifieke bevindingen toegelicht.

Auteur	Concept	Besparing	Specifieke bevindingen
Zhang (2023)	MV-VRPD	10-15%	Multi-visit is optimaal. Single visit 5% goedkoper dan traditionele methoden.
Chiang (2019)	Cost-analysis	25-40%	Besparing routekosten
Poikonen (2017)	PDSTSP	25%	Drones zijn effectief voor korte afstanden. Batterijcapaciteit beperkt toepassing.
Ha (2018)	VRPD	10-25%	Gecombineerde systemen zijn optimaal.
Gu (2023)	DVRPD	15%	Operationele kosten zijn lager en bevorderen de acceptatiegraad met 50% door dynamische route-aanpassing.
Murray (2020)	mFSTSP	20%	Meerdere drones zijn effectief in gebieden met hoge klantichtheid.

Tabel 5: Overzicht kostenbesparing drones vs traditioneel

Ook Jazairy et al. (2023) onderzoekt de opportuniteiten van UAVs, met bijzondere aandacht voor het kostenbesparende potentieel. De kostenbesparing is volgens hen te verklaren door verschillende factoren, waarvan zij een overzicht van geven. Ten eerste zijn de investerings- en operationele kosten van drones relatief laag in vergelijking met traditionele voertuigen. Daarnaast verhoogt het gebruik van UAV's de efficiëntie van het transport, onder meer door kortere levertijden en flexibelere routes. Ook arbeidskosten kunnen worden beperkt, aangezien er minder personeel nodig is voor leveringen. Verder leiden UAV's tot lagere voorraad- en opslagkosten, doordat snellere leveringen just-in-time bevoorrading ondersteunen. Tot slot verkleinen drones de kans op foutieve leveringen, wat bijkomende kosten helpt vermijden.

De resultaten die zij bespreken zijn parallel aan de besparingen die in de tabel staan opgelijst of zelfs groter door het opnemen van duurzaamheidsindicatoren in hun rapportering. Gemiddeld gezien kunnen we concluderen dat het gebruik van drones een gemiddelde kostenbesparing van ongeveer 20% met zich mee brengt ten opzichte van de traditionele levermethoden waarbij enkel vrachtwagens gebruikt worden. Het belang van de samenwerking tussen vrachtwagens en drones wordt hierbij sterk benadrukt.

2.7 Batterijcapaciteit binnen VRPD

In deze sectie wordt de rol van batterijcapaciteit binnen VRPD besproken. De opportuniteiten van drones zijn namelijk zeer afhankelijk van de batterijcapaciteit, wat vaak als bottleneck gezien wordt om het gebruik van drones te realiseren. Binnen VRPD-modellen moet de batterijcapaciteit mee in rekening genomen worden. Daarom zullen er verschillende formuleren besproken worden over hoe dit in het model verwerkt kan worden. Het VRPD-model dat voorzien wordt in het praktijkgedeelte van deze masterproef bevat enkele concepten die hierin besproken worden.

2.7.1 Inleiding

In traditionele Vehicle Routing Problems (VRP) en Vehicle Routing Problems with Drones (VRPD) wordt soms aangenomen dat voertuigen en drones onbeperkt kunnen rijden of vliegen. In de praktijk speelt echter de batterijcapaciteit een cruciale rol, vooral bij elektrische voertuigen (EV's) en drones. De batterijcapaciteit heeft direct invloed op hun rij- of vliegbereik en de algehele prestaties (El Habti, 2024). Het bepaalt of een voertuig of drone klanten kan bereiken zonder afhankelijk te zijn van aanvullende infrastructuur, zoals oplaadstations of batterijwisselstations. Recent onderzoek biedt waardevolle inzichten in de duurzaamheid en degradatiepatronen van EV-batterijen.

Een studie uitgevoerd door het adviesbureau P3, waarbij de prestaties van meer dan 7.000 elektrische voertuigen werden geanalyseerd, toont aan dat EV-batterijen langer bruikbaar zijn dan vaak wordt aangenomen (Hackmann, 2024). De resultaten tonen dat batterijen na 100.000 kilometer gemiddeld nog 90% van hun oorspronkelijke capaciteit behouden, en zelfs na 300.000 kilometer blijft de capaciteit rond de 87%. Sanguesa et al. (2021) bevestigen deze resultaten. Deze bevindingen suggereren dat EV's een langere levensduur kunnen hebben dan traditionele voertuigen met verbrandingsmotoren, omdat de batterijcapaciteit minder snel degradeert dan eerder gedacht.

Hoewel EV-batterijen over het algemeen duurzaam zijn, kunnen omgevingsfactoren en gebruikspatronen de degradatie versnellen (El Habti, 2024). Foutief gebruik van laders en blootstelling aan extreme temperaturen kunnen leiden tot een snellere afname van de batterijcapaciteit. Bij vrieskou kan het rijbereik bijvoorbeeld met 20% tot 30% afnemen (Ghalkhani et al., 2023).

De beperkte actieradius van EV's en drones, veroorzaakt door hun beperkte batterijcapaciteit, introduceert extra complexiteit in het routeringsproces (El Habti, 2024). Vooral in het Electric Vehicle Routing Problem (EVRP), dat rekening houdt met energieverbruik, oplaadstations, oplaadtijden en batterijbeperkingen. Zowel in het EVRP als het VRPD zijn batterijmanagement en laadstrategieën essentieel om efficiënte en duurzame logistieke oplossingen te ontwikkelen. Planners moeten niet alleen rekening houden met de afstand en tijd tussen klanten, maar ook met het energieverbruik, de beschikbaarheid van oplaadstations, en de tijd die nodig is voor opladen of batterijwissels. Om deze uitdagingen aan te pakken, zijn diverse strategieën en modellen ontwikkeld. Hieronder worden

enkele belangrijke concepten en benaderingen beschreven die zijn ontstaan door de integratie van batterijcapaciteit in EVRP en VRPD:

- **Batterijwisselsystemen** (Ahmad et al., 2020): In plaats van te wachten op het opladen van batterijen, kunnen EV's en drones gebruikmaken van batterijwisselstations waar lege batterijen snel worden vervangen door volle. Dit vermindert de stilstandtijd aanzienlijk en verhoogt de operationele efficiëntie. Deze strategie vereist echter menselijke handelingen of geautomatiseerde systemen en een gestandaardiseerd batterijontwerp.
- **Dynamische routeaanpassing** (Gu, 2023): Door real-time data te gebruiken, zoals verkeersomstandigheden, weersveranderingen, of de beschikbaarheid van oplaad- of wisselstations, kunnen routes dynamisch worden aangepast. Dit helpt om onverwachte situaties te beheersen, zoals een onverwacht hoog energieverbruik of beperkte beschikbaarheid van stations, en verbetert de efficiëntie.
- **Optimalisatie-algoritmen** (Sorbelli et al., 2022): Geavanceerde algoritmen, zoals Adaptive Large Neighborhood Search, zijn ontwikkeld om routes te optimaliseren met inachtneming van batterijcapaciteit, oplaadtijden, en andere beperkingen. Deze algoritmen balanceren de trade-offs tussen energieverbruik, levertijden, en kosten, en zijn bijzonder effectief voor complexe scenario's zoals het VRPD, waar drones en vrachtwagens moeten samenwerken.

De integratie van elektrische voertuigen en drones in logistiek vraagt om een herziening van traditionele routeplanning. Door inzet van batterijwissels, dynamische routeaanpassingen en geavanceerde optimalisatie-algoritmen kunnen bedrijven efficiëntere en duurzamere leveringsstrategieën ontwikkelen, wat de operationele prestaties verbetert en de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen vermindert.

2.7.2 De rol van de batterijcapaciteit van drones in LMD

De batterij is een cruciaal onderdeel van een elektrisch voertuig en bepaalt een aanzienlijk deel van de operationele en aanschafkosten (Abronzini et al., 2019). Voor elektrische drones is dit niet anders, aangezien hun actieradius en prestaties volgens Lee et al. (2021) direct afhangen van de batterijcapaciteit en efficiëntie. Lithiumbatterijen, voor het gebruik van drones, zijn populair vanwege hun hoge energiedichtheid, relatief lage kosten en snelle oplaadbaarheid (Cataldo-Díaz et al., 2022)

Volgens Gerssen-Gondelach et al. (2012) zal de capaciteit van deze batterijen tegen 2030 aanzienlijk toenemen, terwijl de kosten van lithiumbatterijen verder zullen dalen, wat de inzetbaarheid van drones voor logistieke toepassingen zal verbeteren (Gerssen-Gondelach et al., 2012). Deze bevinding is veelbelovend voor drones binnen LMD. De maximale vliegduur van drones blijft natuurlijk sterk afhankelijk van factoren zoals batterijcapaciteit, belasting en weersomstandigheden. Zeker wanneer er meerdere bezoeken per dronevlucht toegelaten worden, kan een verbetering in

batterijcapaciteit voordelen bieden om grotere dronevluchten te faciliteren. Zoals besproken in sectie 2.6 is een multi-visit model aanzienlijk voordeliger dan single-visit modellen (Zhang, 2023).

Diverse studies hebben zich gericht op het optimaliseren van het oplaadproces van elektrische voertuigen binnen het VRP (Dastpak et al., 2024). Sommige onderzoeken analyseren de optimale locaties van laadstations (Alba, 2021) om de totale reistijd en operationele kosten te minimaliseren, terwijl andere zich richten op de invloed van factoren zoals verkeersdrukke, route beperkingen en voertuig capaciteit. Een veelvoorkomende benadering is om voertuigen een volledige oplaadcyclust te laten doorlopen bij laadstations. Recentere studies hebben echter ook de mogelijkheid van gedeeltelijke laadcycli geïntegreerd, wat voordelig kan zijn voor het minimaliseren van batterijdegradatie. Dit is met name relevant voor drones, waarbij snelle en frequente laadsessies nodig kunnen zijn om efficiënte logistieke operaties te garanderen. Laadbeurten op de vrachtwagen zelf bieden uiteraard voordelen op vlak van tijdsbesparing.

Onderzoek toont aan dat diepe ontladingen de levensduur van batterijen aanzienlijk verkorten in vergelijking met frequente, gedeeltelijke ontladingen. Voor drones wordt daarom aanbevolen om laadniveaus tussen 25% en 85% aan te houden om een optimale balans tussen levensduur en operationele inzetbaarheid te behouden. Dit wordt veroorzaakt door het concaaf laadpatroon wanneer de batterijcapaciteit 80% is, wat dus tijdsintensiever is (Cataldo-Díaz et al., 2022). Aangezien de volledige batterijcapaciteit van de drone dus niet benut zal worden, zal het bereik van de drone dus verminderen. Ook de degradatie van de drone moet in de gaten gehouden worden. Een batterij wordt doorgaans als 'einde levensduur' beschouwd wanneer de capaciteit onder 80% van de oorspronkelijke waarde daalt (Cataldo-Díaz et al., 2022).

Naast traditionele laadstrategieën zijn er alternatieve oplossingen voorgesteld, zoals batterijwisselstations en mobiele laadpunten, waardoor drones sneller weer operationeel kunnen zijn (Wang et al., 2022). Onderzoek naar drone-routing houdt steeds meer rekening met realistische factoren zoals aerodynamische weerstand, regeneratief remmen, windinvloeden, snelheid en topografie (Poikonen et al., 2020). Hoewel veel studies zich hebben gericht op elektrische voertuigen binnen het VRP, blijft er een duidelijke behoefte aan geavanceerde modellen die specifiek gericht zijn op drones. Deze modellen moeten batterijdegradatie, laadstrategieën en operationele beperkingen op een realistische manier integreren, zodat drone-gebaseerde logistieke netwerken efficiënter kunnen worden ontworpen en beheerd.

Hiernaast concludeerden Murray et al. (2015) dat strategische plaatsing van de vrachtwagen essentieel is om de efficiëntie van droneleveringen te maximaliseren. Bij een kleine actieradius kunnen drones slechts korte afstanden overbruggen, wat betekent dat vrachtwagens nog steeds het grootste deel van de leveringen moeten uitvoeren. Aangezien de drones sneller en duurzamer zijn dan de vrachtwagens, beperkt dit de efficiëntie van het systeem, vooral in dunbevolkte gebieden.

Ha et al. (2018) stelden vast dat frequente oplaadbehoeften van drones kunnen leiden tot langere levertijden en hogere operationele kosten. Hierdoor is het noodzakelijk om niet alleen de drone-actieradius te optimaliseren, maar ook de oplaadmomenten en landingslocaties strategisch te plannen. Poikonen et al. (2017) onderzochten de invloed van geavanceerde batterijtechnologieën

op drone-efficiëntie en concludeerden dat batterijen met een langere levensduur de logistieke kosten met bijna 10% kunnen verlagen.

Zowel in het Electric Vehicle Routing Problem (EVRP) als het Vehicle Routing Problem with Drones (VRPD) speelt batterijcapaciteit dus een centrale rol in de routeoptimalisatie. Bij EVRP ligt de nadruk op strategische laadplanning en batterijwisselsystemen om stilstandtijd te minimaliseren, terwijl VRPD focust op de samenwerking tussen vrachtwagens en drones om de actieradius te maximaliseren. Door de voortdurende vooruitgang in batterijtechnologie en optimalisatiemodellen kunnen deze uitdagingen steeds beter worden aangepakt, wat de inzetbaarheid en duurzaamheid van zowel elektrische voertuigen als drones in logistieke operaties verder zal verbeteren.

2.7.3 Beperkingen op batterijcapaciteit

In deze sectie worden enkele beperkingen besproken die gebruikt kunnen worden om de batterijcapaciteit van de drone te limiteren. Op basis van deze concepten wordt in het empirisch deel een restrictie op de batterijcapaciteit geïntegreerd. Ook wordt er gebruik gemaakt van een vereenvoudigde batterijwissel. Dat concept wordt toegelicht op het einde van dit deel.

De adoptie van elektrische voertuigen (EV's) groeit wereldwijd als een duurzaam alternatief voor traditionele voertuigen met verbrandingsmotoren, gedreven door de behoefte aan lagere koolstofemissies en verbeterde energie-efficiëntie. Een artikel van Martin et al. (2024) beschrijft hoe UAV's unieke uitdagingen met zich mee brengen, met name in batterijbeheer binnen routeringsproblemen. Deze problemen omvatten onder andere EVRP's en ETOP's (Electric Team Orienteering Problem, maximaliseren van beloningen door selectieve klantbezoeken). De lage energiedichtheid van batterijen beperkt het rijbereik, wat frequente oplaadbehoeften en complexe routeringsbeslissingen met zich meebrengt. Belangrijke factoren die het batterijbereik beïnvloeden zijn onder meer voertuigmassa, temperatuur, luchtweerstand, rolweerstand, batterijkoeling, verkeer, snelheid en airconditioning. In dit onderdeel bespreken we enkele mogelijkheden om de batterijcapaciteitsbeperken te integreren in een model.

In zo goed als alle VRP-modellen starten en eindigen routes bij het depot. Elke klant wordt precies één keer bezocht en de totale vraag per route mag de voertuigcapaciteit niet overschrijden. Voor drones is dit een mobiel depot in VRPD, de vrachtwagen. Voor elektrische voertuigen (EV's) wordt daarbovenop een extra beperking opgelegd: de totale reisafstand mag de maximale batterijcapaciteit niet overschrijden. Om dit te duiden wordt dit eenvoudig voorgesteld aan de hand van de volgende restrictie:

$$\sum_{(i,j) \in E} d_{ij} x_{ij} \leq L_h$$

Hierbij wordt de som genomen over alle gebruikte wegen ($x_{ij} = 1$) ,vermenigvuldigd met de afstand d_{ij} om van i naar j te gaan. Indien de weg genomen wordt, moet de afstand van de weg

kleiner zijn dan de batterijcapaciteit L_h , die uitgedrukt wordt in afstand. Bij het gebruik van drones geldt deze restrictie voor elke trip die de drone maakt. Bij veel onderzoeken wordt deze restrictie niet zo eenvoudig gebruikt, maar er wordt een factor toegevoegd die de batterijvermindering per afstand voorstelt.

Kyriakakis et al. (2022) gebruikt zo een complexere restrictie voor de batterijcapaciteit. De beperking zorgt ervoor dat het totale energieverbruik tijdens een dronetrip niet groter is dan de maximale batterijcapaciteit van de drone. Daarbij wordt rekening gehouden met alle mogelijke trajecten die de drone kan volgen tussen twee knopen i en j , via een tussenliggend servicepunt s . Het energieverbruik op elk traject wordt gemodelleerd als de afstand d_{ij} , vermenigvuldigd met een correctiefactor $(1 + f_{ijsk}^2)$. Deze factor houdt bijvoorbeeld rekening met externe invloeden zoals wind, hoogteverschillen of lading, die het energieverbruik kunnen beïnvloeden. De binaire variabele z_{ijsk} geeft aan of drone k daadwerkelijk het traject van i naar j via servicepunt s aflegt. De som van het energieverbruik over alle gekozen trajecten mag de beschikbare energie E^D van drone k niet overschrijden. Deze beperking is cruciaal om te garanderen dat de drone zijn route succesvol kan uitvoeren zonder energiegebrek, en houdt rekening met zowel de afstand als omgevingsfactoren die de energieconsumptie beïnvloeden.

$$\sum_{i \in A2} \sum_{j \in A4} \sum_{x \in V} (1 + f_{ijsk}) * d_{ij} * z_{ijsk} \leq E^D, \forall k \in K^D$$

Bij het model van Kucukoglu et al. (2021) wordt deze beperking op een gelijkaardige manier omschreven, maar met een maximaal toegestane routeafstand per voertuig. Hoewel hij enkel wegvoertuigen gebruikt, kan een gelijkaardige manier gebruikt worden voor drones. Hierbij wordt de correctiefactor vervangen door een energieconsumptie over afstand d_{ij} , vermenigvuldigd met een verbruiksfactor h . De term $Q(1 - x_{ij})$ zorgt ervoor dat de beperking enkel actief is wanneer boog (i,j) daadwerkelijk gebruikt wordt. Indien dit niet het geval is, wordt de beperking automatisch voldaan. De maximale batterijcapaciteit wordt gegeven door Q . Deze beperking heeft ook betrekking op de energieconsumptie tijdens het rijden en zijn essentieel voor correcte modellering van energiehuishouding tijdens het routeplan:

$$y_j \leq y_i - (h * d_{ij})x_{ij} + Q(1 - x_{ij})$$

Deze beperking stelt dat het batterijniveau y_j bij aankomst in knooppunt j gelijk is aan het batterijniveau y_i bij vertrek uit knooppunt i , verminderd met de energieconsumptie over de afstand d_{ij} , vermenigvuldigd met een verbruiksfactor h .

Kucukoglu et al. (2021) gebruikt laadstations en moet daarom altijd zorgen dat het batterijniveau bij vertrek van een laadstation Y_i altijd groter of gelijk is aan het batterijniveau y_i waarmee het EV binnenkwam en kleiner of gelijk aan de maximale batterijcapaciteit Q :

$$y_i \leq Y_i \leq Q$$

Een laatste beperking die hij gebruikt garandeert dat alle voertuigen vertrekken vanuit het depot (knooppunt 0) met een volledig opgeladen batterij, oftewel met batterijniveau gelijk aan de maximale capaciteit Q .

$$y_0 = Q$$

Deze beperkingen vormen samen een robuust energiebeheermodel voor EV-routing en zijn essentieel om routes te plannen die fysiek realiseerbaar zijn binnen de beperkingen van batterijcapaciteit, afstand en laadinfrastructuur. Deze beperkingen kunnen ook gebruikt worden bij een model dat gebruikt maakt van drones.

Een andere manier die gebruikt kan worden is het gebruik van een batteryswap. Stamadianos et al. (2025) maken uitgebreid gebruik van battery swapping stations in hun onderzoek. Deze stations noemen battery replacement stations (BRS) en spelen een cruciale rol in het beheren van de beperkte batterijcapaciteit van de drone door de actieradius van de UAV te vergroten. Hierdoor kan de drone meer locaties per trip bezoeken, wat leidt tot tijdsbesparing in grote modellen. De drone kiest met behulp van de BRS heuristiek welke BRS te bezoeken, afhankelijk van de beschikbaarheid van batterijen en de energie die nodig is om de BRS te bereiken zonder de batterijcapaciteit te overschrijden.

De drone moet dus terugkeren naar een BRS, of een depot, voor deze batterijcapaciteit bereikt wordt. Dat wordt gemodelleerd door de volgende beperking waarbij de linkerkant het totale energieverbruik over alle bogen berekent en de rechterkant ervoor zorgt dat het totale energieverbruik wordt beperkt door het aantal bezoeken aan BRS of het depot (x_{rj}), waarbij elke batterijvervanging de energiec capaciteit reset naar de maximale capaciteit E .

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} (D_{ij} * (U + f_{ij}) * x_{ij}) \leq E * \sum_r \sum_j x_{rj}$$

Verder zijn er nog beperkingen op het aantal bezoeken per BRS, dit door het aantal batterijen dat daar gestockeerd is. De experimenten van Stamadianos et al., (2025) tonen aan dat het algoritme een gemiddelde verbetering van 13,13% behaalt in totale reistijd ten opzichte van de initiële oplossingen. De hoge investeringskost van een BRS is echter een nadeel.

3. Praktijkgedeelte

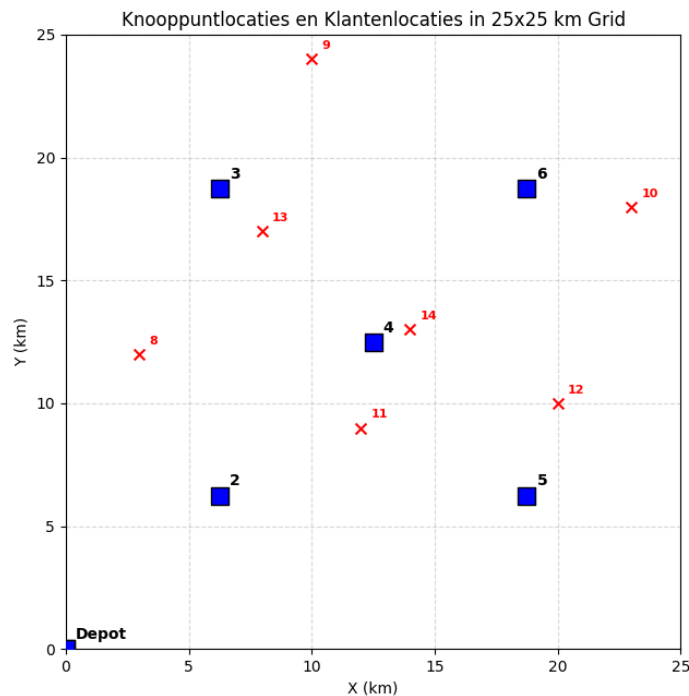
3.1 Inleiding tot VRPD-model

Het ambitieuze idee om pakketten uitsluitend via drones te bezorgen lijkt in de praktijk niet haalbaar. Een massa drones vanuit magazijnen zou inefficiënt ontoereikend bereik en tekort aan infrastructuur (Poikonen et al., 2020). Daarentegen biedt de combinatie van vrachtwagens met zware drones meer perspectief, waarbij drones niet zelfstandig alle leveringen kunnen uitvoeren zonder vrachtwagenondersteuning (Murray, 2015). Deze hybride aanpak kan verzending versnellen en kosten verlagen door de sterke punten van beide te benutten (Wohlsen, 2014). Bedrijven zoals Amazon, WalMart, Google, Alibaba, DHL en SF Express hebben succesvolle tests uitgevoerd geloven in een veelbelovende implementatie van drones in de logistieke sector.

Voor dit empirisch deel werd zelfstandig een VRPD-model opgesteld. Het VRPD-model is geïnspireerd door de innovatieve concepten van Murray et al. (2015) en op de VRPD-structuur die Dolgui (2021) toepaste. Vanwege de complexiteit om bestaande wiskundige notaties over te zetten naar LINGO-software, is er gekozen voor een zelfopgestelde VRPD-code, ondersteund door inzichten uit de LINGO-code van El Habti (2024). Dit komt door het moeilijk traceren van de fout bij een foutmelding in LINGO. Geen voormalig onderzoek combineert één drone en vrachtwagen op dezelfde manier als dit VRPD-model. De gebruikte logica in de code, zoals de drone-lussen, zijn zelf ontwikkeld.

Het doel van het VRPD-model is het minimaliseren van de makespan. Dit omvat de totale reistijd plus de duurtijd van de batterijwissel van de drone. Het model kan voor elk aantal klanten de snelste route vinden door een vrachtwagen en drone te combineren. Hierbij rijdt de vrachtwagen tot elk vrachtwagenknooppunt van waaruit de drone een trip maakt om één of meerdere klanten te bezoeken. De locaties van deze vrachtwagenknooppunten zijn vooraf geplaatst op strategisch gekozen locaties. Een vrachtwagenknooppunt dat niet gebruikt wordt door de drone, zal dus ook niet gebruikt worden door de vrachtwagen. Dit zorgt voor dynamische routes van de truck zodat er geen tijdverlies is door vrachtwagenknooppunten zonder reden te bezoeken.

De gebruikte setting is een grid van 25 bij 25 kilometer, waarbij de vrachtwagenknooppunten geografisch verspreid zijn over het oppervlak. Zoals weergegeven in Figuur 10, bevinden zich vier knooppunten in de buitenwijken van een fictieve stad en één knooppunt centraal in het stadsgebied (vierkanten 2-6). Deze configuratie is realistisch, aangezien het in de praktijk vaak moeilijk is om meerdere parkeerlocaties voor vrachtwagens te voorzien binnen het stedelijk centrum. Het depot, dat zowel als start- als eindpunt van de route fungeert, is iets verder van het stadscentrum geplaatst. Dit sluit aan bij de realiteit, waar depots vaak gelegen zijn op industrieterreinen buiten het centrum. De locaties van de klanten zijn random bepaald (kruisjes 8-14). De coördinaten van de vrachtwagenknooppunten en klantknooppunten worden gegeven in tabel 6.



Figuur 10: Locaties knooppunten VRPD-model

Node	Coördinaat	Klant	Coördinaat
1	(0, 0)	8	(3, 12)
2	(6,25 ; 6,25)	9	(10, 24)
3	(6,25 ; 18,75)	10	(23, 18)
4	(12,5 ; 12,5)	11	(12, 9)
5	(6,25 ; 18,75)	12	(20, 10)
6	(18,75 ; 18,75)	13	(8, 17)
7	(0, 0)	14	(14, 13)

Tabel 6: Coördinaten knooppunten VRPD-model

De vrachtwagen rijdt met een constante snelheid van 20km/u. Deze snelheid wordt gebruikt door meerdere papers, onder andere door El Habti (2024). Deze waarde wordt veranderd naar 10 km/u en 30 km/u, aangezien het verkeer in een stad niet altijd even druk is. Op deze manier kan is het berekenen van de gemiddelde reisduur meer realistisch. De drone vliegt met een constante snelheid van 50km/u, wat ook gebruikt wordt in de paper van Murray (2015). Ook deze waarde laten we veranderen tot 40 km/u en 60km/u om het effect van de dronesnelheid te onderzoeken. Het grote verschil in snelheid wordt veroorzaakt doordat de drone in vogelvlucht kan vliegen zonder ophouding, terwijl de vrachtwagen niet in een rechte lijn kan rijden naar zijn bestemming en gehinderd wordt door congestie.

De drone kan een dronevlucht, een trip, maken met maximaal één, twee of drie klanten en moet vervolgens terugkeren naar dezelfde vrachtwagenlocatie als waar hij vertrok. Het toegelaten aantal klanten per dronevlucht wordt bepaald door de parameter 'max_parcel'. Het model kan zowel een single-visit structuur toelaten als een multi-visit structuur. In VRPD-studies wordt vaak een maximum van drie klanten per dronevlucht gebruikt vanwege een combinatie van praktische en theoretische beperkingen. Meer dan drie klanten per dronevlucht wordt vaak gezien als onrealistisch,

aangezien de drone niet meer zou kunnen dragen. Dit komt door de capaciteit van de drone, zowel op vlak van volume als gewicht maar ook door de batterijcapaciteit. Elke extra klant zorgt voor een hoger energieverbruik door langere vliegafstanden en extra gewicht, wat vaak een limiet van drie klanten praktisch maakt om binnen de batterijduur van 20-30 minuten te blijven. Bovendien verhoogt een groter aantal klanten de complexiteit van optimalisatiemodellen aanzienlijk, wat berekeningen zwaarder maakt. Een maximum van drie klanten per dronevlucht biedt dus een optimale balans tussen operationele efficiëntie, batterijbeheer en rekencomplexiteit.

Wanneer het maximaal toegelaten aantal klanten dat de drone kan bezoeken per vlucht aangepast moet worden, moeten er enkele beperkingen en formules uitgeschakeld (of aangezet) worden in het LINGO-model. Deze formuleringen hebben betrekking op de parameter 'max_parcels'. De waarde van deze parameter zal variëren en de impact op de makespan en de route zal onderzocht worden. De terugkeer van de drone naar hetzelfde knooppunt als van waar hij vertrok, wordt verplicht aangezien er meerdere trips mogelijk zijn uit één vrachtwagenknooppunt en om de batterijwissel uit te voeren nadat de drone een trip gemaakt heeft. Het opleggen van deze terugkeer is een FSTSP-eigenschap en maakt het model beter beheersbaar.

Om het gebruik van de drone realistisch te maken, wordt er gebruik gemaakt van een batterijcapaciteit van 18, 24 en 30 minuten (0.3, 0.4 en 0.5 uur). Deze waarden zullen gebruikt worden om het effect van de batterijcapaciteit op de makespan en de route te onderzoeken. In combinatie met verschillende dronesnelheden, kan de drone enkel trips maken die niet langer zijn dan dat de batterijduur toelaat. Door de batterijcapaciteit en de dronesnelheid te verminderen is de verwachting dat er enkele kanten niet bereikbaar zullen zijn van een centraal knooppunt, en zal de vrachtwagen naar het knooppunt moeten rijden dat dichterbij de klant ligt. Dit zal extra tijd kosten door extra vrachtwagengebruik. Door een verhoging van de batterijcapaciteit, wordt er verwacht dat het gebruik van de vrachtwagen daalt, op vlak van afstand, omdat de drone dan langere trips kan maken en sneller is. Na elke gemaakte trip van de drone, wordt er een batterijwissel gebruikt die een duur heeft van twee minuten. Dit is gebaseerd op het voorgestelde concepten van Ahmad et al. (2020) en Stamadianos et al. (2025). Op deze manier wordt de drone efficiënt ingezet. Het toevoegen van de batterijwissel kan ervoor zorgen dat het aantal trips verminderd wordt, indien mogelijk, aangezien elke gebruikte trip een toegevoegde duur zal hebben van twee minuten.

Net zoals het onderzoek van Wang et al. (2019), onderscheidt dit VRPD-model zich ten opzichte van andere onderzoeken doordat de drone meerdere klanten kan bedienen per trip. In studies wordt namelijk steeds vaker de mogelijkheid van meerdere bezoeken (multi-visit) per dronevlucht onderzocht. Zoals besproken in sectie 2.6 zorgt dit voor een aanzienlijke kostenbesparing. Andere modellen variëren in aanpak, aantal klanten per dronevlucht en doelfunctie.

Auteur	Probleem	Benadering	Dronecapaciteit	Doelstelling
Murray (2015)	1-Vrachtwagen; 1-Drone	Heuristiek	1 Klant	Min makespan
Wang (2019)	M-Vrachtwagen; N-Drone	Exact algortime	M Klanten	Min logistieke kost
Ponza (2016)	1-Vrachtwagen; 1-Drone	Heuristiek	1 Klant	Min makespan
Carlsson (2017)	1-Vrachtwagen; 1-Drone	Heuristiek	1 Klant	Min reistijd
Agatz (2018)	1-Vrachtwagen; 1-Drone	Heuristiek	1 Klant	Min logistieke kost
Ha (2018)	1-Vrachtwagen; 1-Drone	Heuristiek	1 Klant	Min operationele kost
Ham (2018)	M-Vrachtwagen; N-Drone	Heuristiek	1 Klant	Min maximale tijd
Chang (2018)	1-Vrachtwagen; M-Drone	Heuristiek	1 Klant	Min makespan
Dit werk	1-Vrachtwagen; 1-Drone	Exact algoritme	M klanten	Min makespan

Tabel 7: Opstelling bestaande VRPD-modellen

Het model bevat dus realistische aspecten en simuleert stedelijke omstandigheden met vaste parkeerlocaties (realistisch voor steden). Ook wordt een tijdslimiet (R) toegevoegd om de werkdag van een chauffeur voor te stellen (vereenvoudigd tijdvenster). De makespan mag deze tijdslimiet niet overschrijden. Capaciteitsbeperkingen op een vereenvoudigde manier voorgesteld. Het toegelaten aantal klanten, of parcels, per dronetrip gezien kan worden als de capaciteit van de drone. Door de assumptie dat elke klant één parcel bestelt, worden er maximaal drie parcels toegelaten. Het volume en gewicht van de parcels wordt genegeerd.

In de testen wordt onderzocht welke invloed de batterijcapaciteit heeft op de route die de vrachtwagen en drone maken en de bijhorende makespan per route. Bij een verschillende batterijcapaciteit wordt verwacht dat niet enkel de route van de drone veranderen, maar ook de route van de vrachtwagen. Ook de toegelaten hoeveelheid parcels per dronetrip (max_parcel) zou een invloed moeten hebben op de reistijd en de trips, onder verschillende batterijcapaciteiten. Ook worden de snelheden van de drone en vrachtwagen aangepast om te onderzoeken wat het effect is van een hogere en lagere snelheid op de trips en de makespan. Bij het onderzoek werden meerdere opstellingen gemaakt, waarbij de genoemde parameters veranderen, om uiteindelijk een conclusie te trekken uit het onderzoek.

Analyses

In dit onderzoek wordt met één start- en einddepot, vijf vrachtwagenknooppunten en zeven klanten de impact van de batterijcapaciteit, drone- en vrachtwagensnelheid en het toegelaten aantal parcels per dronetrip het effect op de makespan en de routestructuur geanalyseerd. Er worden in totaal 81 opstellingen gehanteerd om het onderzoek uit te voeren. Elke opstelling heeft een verschillende combinatie van parameterwaarden. Deze waarden worden gegeven in tabel 8. Aan de hand de resultaten van die 81 opstellingen zullen de volgende analyses gemaakt worden:

- Analyse 1: Effect van de batterijcapaciteit op de makespan en de routestructuur
 - De batterijcapaciteit wordt veranderd om de totale reistijd van de vrachtwagen en drone te onderzoeken. Ook het aantal dronetrips en het aantal vrachtwagenstops wordt geanalyseerd.
- Analyse 2: Het effect van de batterijcapaciteit en de vrachtwagen- en dronesnelheid op het gebruik van de vrachtwagen en drone
 - De snelheden van beide voertuigen worden aangepast om het gebruik van de drone te vergelijken met het gebruik van de vrachtwagen, op vlak van tijd en afstand.
- Analyse 3: Het effect van het aantal parcels per dronevlucht op de makespan en de routestructuur en de rol van de batterijcapaciteit hierbij.
 - Per dronevlucht worden er maximaal één, twee of drie parcels meegenomen door de drone. Dit zal een vergelijking teweeg brengen van een single-visit model en een multiple-visit model.

Parameter	Waarden
Batterijcapaciteit	0.3, 0.4, 0.5
Snelheid vrachtwagen	10, 20, 30
Snelheid drone	40, 50, 60
Aantal parcels per vlucht	1, 2, 3

Tabel 8: Overzicht parameterwaarden voor 81 opstellingen

Om de resultaten van het onderzoek te visualiseren worden er tabellen voorzien met de waarden van de makespan, totale truck tijd (TTT), totale drone tijd (TDT), aantal dronevluchten, vrachtwagenstops, etc. Ook worden er enkele figuren weergegeven om de gebruikte route door vrachtwagen en drone te visualiseren.

3.2 VRPD-model

3.2.1 Assumpties

In deze sectie worden de assumpties besproken die genomen werden bij het opstellen van het VRPD-model, in functie van het uitvoeren van het onderzoek. De assumpties zijn deels geïnspireerd op de modellen die Murray et al. (2015) en Ponza (2016) hebben gemaakt en de concepten die ze hebben gebruikt. Aangezien in deze paper een model van nul is ontwikkeld, zijn de assumpties afgestemd op de het voorgestelde VRP-model en het doel van de paper. De assumpties worden ingedeeld in verschillende categorieën, afhankelijk van het aspect waar ze betrekking op hebben.

Ten eerste worden er enkele algemene assumpties geformuleerd die voorwaarden voorstellen waar zeker aan voldaan moet worden.

- Eén vrachtwagen en drone: Er is slechts één vrachtwagen en één drone beschikbaar.
- Tijdslimiet: Alle activiteiten moeten binnen R uur worden voltooid. Dit stelt de duur van één werkdag voor, aangezien de vrachtwagenchauffeur in een shift werkt. Meestal werd R op tien uur geplaatst.
- Alle klanten moeten bediend worden.
- De vrachtwagen heeft geen extra tijd nodig bij stops.
- Geen pakketlimiet voor de vrachtwagen.
- Een klant bestelt altijd één parcel.
- De drone bedient maximaal drie klanten per vlucht.
- Het gewicht of aantal van de parcels heeft geen invloed op de batterijduur of snelheid van de drone.
- Er zijn geen retourzendingen mogelijk.

Vervolgens maken we enkele assumpties die betrekking hebben op de samenwerking tussen vrachtwagens en drones:

- Dynamische vrachtwagenstops: De vrachtwagen stopt alleen bij vrachtwagenknooppunten die gebruikt worden door de drone.
- De vrachtwagen bezoekt elk vrachtwagenknooppunt (behalve het depot) hoogstens één keer.
- Rechte lijnen: De vrachtwagen en drone reizen in rechte lijnen tussen punten en klanten. De afgelegde afstand wordt berekend met door de euclidische afstand tussen de nodes.
- De vrachtwagen rijdt met een constante snelheid van 20 km/u, en de drone vliegt met een constante snelheid van 50 km/u, tenzij deze waarden veranderd worden in testen.
- De drone eindigt elke trip op hetzelfde knooppunt als het vertrekpunt van de trip.
- De drone wordt verondersteld constant in de lucht te blijven tijdens een vlucht.
- Er zijn geen storingen of incidenten met de vrachtwagen of drone.

Ook maken we assumpties met betrekking op de batterijcapaciteit van de drone. Deze waarden kunnen we laten variëren om het effect op de totale reistijd te analyseren:

- Drone-batterij: De drone kan 30 minuten vliegen per trip wanneer de batterijcapaciteit op 0.5 uur geplaatst wordt. Wanneer de batterijcapaciteit veranderd wordt, zal deze duur ook veranderen.
- Batterijvervanging: Na elke dronetrip wordt de batterij in 2 minuten vervangen door een batterijwissel. Op deze manier worden lange laadtijden vermeden. De duur van de batterijwissel wordt opgeteld bij de tijd van elke dronevlucht.
- De drone kan vliegen tot de batterij volledig leeg is.
- Er zijn voldoende opgeladen batterijen beschikbaar in de vrachtwagen.

3.2.2 Wiskundige notatie

In dit deel volgt de wiskundige formulering van het VRPD-model. Ten eerste worden de wiskundige symbolen opgelijst en uitgelegd. Ook de wiskundige notatie van de doelfunctie, formules en verschillende beperkingen wordt gegeven. Hierbij wordt er telkens een bondige uitleg gegeven.

Wiskundige notatie

SET $P = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14\}$: verzameling van alle knooppunten, die volgende nodes voorstellen:

- Node 1 & 7: het depot, gelegen op coördinaten (0,0)
 - Nodes 2-6: de vrachtwagenknooppunten
 - Nodes 8-14: de klantknooppunten
-
- Elke i, j, k, l, m, n , node, $c1, c2, c3$ die gebruikt worden in deze wiskundige formulering is onderdeel van set P .
 - X_{ij} : Binaire variabele gelijk aan 1 als de weg van i naar j genomen wordt door de vrachtwagen, enkel mogelijk tussen vrachtwagenknooppunten.
 - Y_{ij} : Binaire variabele gelijk aan 1 als de weg van i naar j genomen wordt door de drone waarbij i en j beide klanten zijn.
 - Z_{ij} : Binaire variabele gelijk aan 1 als de weg van een klant naar een vrachtwagenknooppunt genomen wordt, of van een vrachtwagenknooppunt naar een klant, door de drone.
 - D_{ij} : De afstand tussen knooppunt i en j
 - V_t : De snelheid van de vrachtwagen, gelijk aan 20 km/u
 - V_d : De snelheid van de drone, gelijk aan 50 km/u
 - TT_{ij} : De reistijd om van een vrachtwagenknooppunt i naar vrachtwagenknooppunt j te reizen met de vrachtwagen.

- $TN(node, c1, c2, c3)$: De reistijd per dronetrip, bestaande uit één, twee of drie klanten ($c1, c2, c3$), vertrekkende van een vrachtwagenknooppunt ($node$).
- $Max_parcels$ = Maximaal aantal pakketjes (één, twee of drie) die geleverd kunnen worden per dronetrip. Gelijk aan het aantal klanten per trip.
- R = De duur van een werkdag, gelijk aan tien uur.
- T_swap : De duur van een batterij-swap, die na elke dronetrip gedaan wordt. Gelijk aan twee minuten.
- $Battery_capacity$: Maximale vliegtijd die een drone kan hebben op één trip, uitgedrukt in uren.
- $Zsum(i)$: Het aantal keer dat de drone vertrekt uit vrachtwagenknooppunt i .
- $Loop(i, j, k, l)$: Trip die een gemaakt wordt door een drone waarbij i een vrachtwagenknooppunt voorstelt en j, k en l klanten. Deze trip kan bestaan uit één klant ($j=k=l$), twee klanten ($j \neq k=l$) (de twee andere mogelijke combinaties ($j=k \neq l$) en ($j=l \neq k$) zijn geen toegelaten trips), of drie klanten ($j \neq k \neq l$).
- $Loop_used(i, j, k, l)$: Binaire variabele gelijk aan 1 als de drone deze trip gebruikt.
- $Loop_distance(i, j, k, l)$: Totale afstand die de drone aflegt in de trip $loop(i, j, k, l)$ (inclusief het vertrekken van/terugkeren naar het vrachtwagenknooppunt). Deze afstand is berekend via een afstandsmatrix (waarin de afstanden van elk punt naar elk ander punt staat).

Wiskundige formulering van het probleem:

Als eerste wordt de doelfunctie (1) toegelicht, vervolgens de beperkingen. De beperkingen hebben betrekking op de volgende categorieën:

- 1) De berekening van reistijden voor vrachtwagen en drone (2-5)
- 2) Het tijdsvensters (6)
- 3) De vrachtwagenroute (7-25)
- 4) De batterijcapaciteit (26-27)
- 5) De drone-verbindingen (28-32)
- 6) De drone-verbindingen, enkel tussen klanten (33-37)
- 7) Drone-verbindingen tussen klant- en vrachtwagenknooppunt (38-47)
- 8) De formules voor dronetrips met 1, 2 of 3 klanten om de gebruikte trip te bepalen (48-50)
- 9) Binaire variabelen (51-54)

$$\text{Min } Z = TTT + TDT \quad (1)$$

De doelfunctie (1) is de som van de totale reistijd van de vrachtwagen en de drone. De TTT (Total Truck Time) is de totale tijd die de vrachtwagen nodig heeft om de route af te leggen tussen alle knooppunten die hij bezoekt. De TDT (Total Drone Time) is de totale tijd die de drone nodig heeft om de klantknooppunten te bezoeken. De tijd voor een batterijwissel van twee minuten per trip is inbegrepen in TDT. Zowel TTT als TDT worden uitgedrukt in uren. Beide waarden zijn afhankelijk

van de gekozen parameterinstellingen en de specifieke route. Omdat de doelfunctie de som van de waarden TTT en TDT minimaliseert, en de duur van de batterijwissel geïntegreerd zit in TDT, richt het model zich niet op de minimale reistijd, maar op het minimaliseren van de makespan.

$$TT_{ij} = \frac{x_{ij} * D_{ij}}{V_t} \quad \forall i, j \leq 7 \quad (2)$$

$$TTT = \sum_{(i,j) \in P} TT_{ij} \quad \forall i, j \leq 7 \quad (3)$$

$$TN(n, c1, c2, c3) = loop_used(n, c1, c2, c3) * \begin{cases} \frac{D_{(n,c1)} + D_{(c1,c2)} + D_{(c2,c3)} + D_{(c3,n)}}{V_d} + t_{swap} & \text{als } c1 \neq c2 \wedge c2 \neq c3 \wedge c1 \neq c3 \\ \frac{D_{(n,c1)} + D_{(c1,c2)} + D_{(c2,n)}}{V_d} + t_{swap} & \text{als } c1 \neq c2 \wedge c2 = c3 \\ \frac{D_{(n,c1)} + D_{(c1,n)}}{V_d} + t_{swap} & \text{als } c1 = c2 = c3 \end{cases} \quad (4)$$

$$TDT = \sum_{Loop(node, c1, c2, c3, c4)} TN(node, c1, c2, c3) \quad \forall node \leq 7, c1, c2, c3 \geq 8 \quad (5)$$

De reistijd van de vrachtwagen tussen de gebruikte vrachtwagenknooppunten (2), wordt berekend op basis van de euclidische afstand tussen de vrachtwagenknooppunten en de snelheid van de vrachtwagen. De vrachtwagen start vanuit het depot en bezoekt enkel de vrachtwagenknooppunten die gebruikt worden door de drone. De totale reistijd van de vrachtwagen (3) is de som van alle tijden tussen de nodes waar de vrachtwagen gepasseerd is, gesommeerd in TTT. De berekening van de tijd per dronetrip wordt weergegeven door (4), waarbij een duurtijd wordt toegevoegd voor de batteryswap. Om dit te kunnen realiseren werd met behulp van python een lijst gegenereerd met alle mogelijke combinaties van trips. Bij het eerste geval wordt een tijdsduur geregistreerd voor een trip naar drie verschillende klanten. Bij het tweede geval zitten er twee klanten in de trip. In (node, c1, c2, c3) is c3 = c2 en c3 ≠ c1. Hierbij worden dus c1 en c2 (=c3) bezocht. De gevallen waarbij er andere combinaties zijn worden ongeldig gemaakt in de LINGO-code. Bij het derde geval voor een trip naar één klant, is c1 = c2 = c3. Wanneer één van deze gevallen gebruikt wordt (loop_used = 1), dan wordt de tijd van de trip genoteerd onder TN(node, c1, c2, c3), anders is TN gelijk aan 0. Of een trip uitgevoerd wordt, wordt dus bepaald door de binaire variabele loop_used. In vergelijking (5) wordt de totale reistijd van de drone berekend door de som te nemen van de tijd van alle trips die gebruikt worden.

$$TTT + TDT \leq R \quad (6)$$

Vergelijking (6) duidt aan dat de totale makespan van het model, dus de waarde van de doelfunctie, lager moet zijn dan de duurtijd van de werkdag (R) van de chauffeur.

$$\sum_{j=1}^7 x_{ij} \leq 1 \quad \forall i < 8, j \neq i \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^7 x_{ij} \leq 1 \quad \forall j < 8, j \neq i \quad (8)$$

$$x_{ij} = 0 \quad \forall i < 8, j \geq 8 \quad (9)$$

$$x_{ji} = 0 \quad \forall j < 8, j \geq 8 \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^7 x_{i7} = 1 \quad \forall i < 8 \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^7 x_{7j} = 0 \quad \forall j < 8 \quad (12)$$

$$\sum_{j=2}^7 x_{1j} = 1 \quad \forall j < 8 \quad (13)$$

$$\sum_{i=2}^7 x_{i1} = 0 \quad \forall i < 8 \quad (14)$$

$$x_{1,7} = 0 \quad (15)$$

$$X_{ii} = 0 \quad \forall i < 8 \quad (16)$$

Beperking (7) laat maximaal één vertrek toe uit elk vrachtwagenknooppunt en beperking (8) laat maximaal één aankomst toe bij elk vrachtwagenknooppunt door de vrachtwagen. De vrachtwagen wordt verboden om naar een klant te reizen (9) of van een klant te vertrekken (10). Restrictie (11) legt op dat er exact één vrachtwagenboog arriveert bij het eindepot. In (12) wordt er verboden dat een vrachtwagen het eindepot verlaat. Voor het startdepot wordt een omgekeerde redenering gevolgd: er mag exact één vertrek zijn (13) en er zijn geen aankomsten toegelaten (14). Een vrachtwagentrip van het startdepot naar het eindepot wordt verboden in (15). Ook mag er geen vrachtwagenverbinding bij hetzelfde knooppunt zijn (16).

$$Zsum(i) = \sum_{i=1}^8 z_{i,klant} \quad \forall i \leq 7, klant \geq 8 \quad (17)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq Zsum(i) \quad \forall i, j \leq 7 \quad (18)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ji} \leq Zsum(i) \quad \forall i, j \leq 7 \quad (19)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \geq \frac{Zsum(i)}{M} \quad \forall i, j \leq 7 \quad (20)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ji} \geq \frac{Zsum(i)}{M} \quad \forall i, j \leq 7 \quad (21)$$

Om ervoor te zorgen dat de vrachtwagen enkel knooppunten bezoekt van waaruit effectief een drone vertrekt naar een klant, wordt $Zsum(i)$ gedefinieerd in formule (17). Deze waarde geeft voor elk knooppunt i het totaal aantal keren weer dat er een drone vertrekt naar een klant. Met andere woorden, $Zsum(i) \geq 1$ wanneer er minstens één drone van knooppunt i naar een klant vliegt, en nul wanneer er geen dronevertrekken zijn vanuit dat knooppunt. Vervolgens worden beperkingen (18) en (19) gebruikt om de verplaatsingen van de vrachtwagen te koppelen aan het dronegebruik. Beperking (18) stelt dat de vrachtwagen enkel mag vertrekken uit knooppunt i indien er een drone vertrekt van dat knooppunt. Op dezelfde manier dwingt beperking (19) af dat de vrachtwagen enkel mag arriveren in knooppunt i als er ook effectief een drone vertrekt van dat knooppunt. Indien $Zsum(i)=0$, dan zijn beide sommen nul, en dus is het onmogelijk voor de vrachtwagen om dit knooppunt te betreden of te verlaten. Is $Zsum(i) = 1$, dan mag het knooppunt deel uitmaken van de vrachtwagenroute. Om deze logica op een alternatieve manier te garanderen, worden in beperkingen (20) en (21) zogenaamde implicaties gemodelleerd via de parameter M , een voldoende groot positief getal. Deze beperkingen zorgen ervoor dat, indien $Zsum(k) \geq 1$, er minstens één vrachtwagenbeweging van of naar knooppunt k plaatsvindt. Omdat de x -variabele binair is, volstaat

deze minieme waarde om af te dwingen dat er minstens één $x_{ij} = 1$ of $x_{ji} = 1$, dus dat de vrachtwagen effectief knooppunt k aandoet. Als $Zsum(k) = 0$, dan zijn de rechterzijden nul, en gelden er geen extra voorwaarden. Deze vier beperkingen samen zorgen er dus voor dat de vrachtwagen enkel knooppunten bezoekt van waaruit daadwerkelijk een drone vertrekt, en vermijden dat de vrachtwagen onnodig langs knooppunten rijdt die niet bijdragen aan de levering aan klanten.

$$x_{ij} + x_{ji} \leq 1 \quad \forall i \neq j, i, j \leq 7 \quad (22)$$

$$x_{ij} + x_{jk} + x_{ki} \leq 2 \quad \forall i \neq j \neq k, i, j, k \leq 7 \quad (23)$$

$$x_{ij} + x_{jk} + x_{kl} + x_{li} \leq 3 \quad \forall i \neq j \neq k \neq l, i, j, k, l \leq 7 \quad (24)$$

$$x_{ij} + x_{jk} + x_{kl} + x_{lm} + x_{mi} \leq 4 \quad \forall i \neq j \neq k \neq l \neq m, i, j, k, l, m \leq 7 \quad (25)$$

Om te vermijden dat de vrachtwagenroute gesloten deelroutes (subtours) bevat, worden beperkingen (22) tot en met (25) ingevoerd. Beperking (22) sluit een 2-cyclus uit, waarbij de vrachtwagen heen en weer rijdt tussen twee knooppunten. Beperking (23) voorkomt dat er een 3-cyclus ontstaat tussen drie knooppunten. Op dezelfde manier voorkomt beperking (24) dat de vrachtwagen een gesloten lus vormt over vier knooppunten. Beperking (25) sluit ten slotte 5-cycli uit, waarbij de vrachtwagen vijf knooppunten bezoekt in een gesloten ronde zonder verbinding met de rest van de route.

$$Loop_{distance}(n, c1, c2, c3) = \begin{cases} D_{(n,c1)} + D_{(c1,c2)} + D_{(c2,c3)} + D_{(c3,n)} & \text{als } c1 \neq c2 \wedge c2 \neq c3 \wedge c1 \neq c3 \\ D_{(n,c1)} + D_{(c1,c2)} + D_{(c2,n)} & \text{als } c1 \neq c2 \wedge c2 = c3 \\ D_{(n,c1)} + D_{(c1,n)} & \text{als } c1 = c2 = c3 \end{cases} \quad (26)$$

$$Loop_{used}(n, c1, c2, c3) * Loop_{distance}(n, c1, c2, c3) \leq Battery_capacity * V_d \quad (27)$$

In formule (26) worden de afstanden bepaald voor elke mogelijke trip. Voor elke gebruikte dronetrip ($Loop_{used}(n, c1, c2, c3) = 1$) moet in restrictie (27) de afgelegde afstand (links) kleiner zijn dan de afstand waarmee je kan vliegen met huidige batterijcapaciteit (rechts). De batterijcapaciteit staat in uur. Welke trip gebruikt wordt, wordt bepaald door de beperking met betrekking op de binaire variabele $Loop_{used}(n, c1, c2, c3)$. De formules voor $Loop_{used}(n, c1, c2, c3)$ volgen in restricties (48-50).

$$\sum_{j \leq 7} z(k, j) + \sum_{j \geq 8} y(k, j) = 1 \quad \forall k \geq 8, k \in P \quad (28)$$

$$\sum_{j \leq 7} z(j, k) + \sum_{j \geq 8} y(j, k) = 1 \quad \forall k \geq 8, k \in P \quad (29)$$

$$total_z_loops = \sum_{j \geq 8} z(i, j) + \sum_{j \geq 8} z(j, i) \quad \forall i, j \in P \quad (30)$$

$$total_y_loops = \sum_{j \neq i} y(i, j) \quad \forall i, j \geq 8 \in P \quad (31)$$

$$total_z_loops \geq \frac{2}{3} * total_y_loops \quad (32)$$

In deze beperkingen wordt een correcte stroom verzekerd tussen vrachtwagen- en klantknooppunten (z), en tussen klanten onderling (y). Restricties (28-29) zorgen ervoor dat elke klant exact één keer bezocht en verlaten wordt. Per klant is er dus een inkomende boog die ofwel geduid wordt door de z-variabele (afkomstig van een vrachtwagenknooppunt) of door een y-variabele (afkomstig van een andere klant). In volgende twee restricties (30-31) wordt een formule opgesteld voor twee nieuwe variabelen: het aantal z-bogen en y-bogen. De waarden van deze variabelen tonen het aantal keer dat de binaire variabele gelijk is aan één, dus het aantal keer dat een $y(i,j)$ of $z(i,j)$ gelijk is aan één. Om een correcte verhouding tussen het aantal y-bogen en z-bogen te verzekeren moeten er voor het totaal aantal z-bogen minstens meer zijn dan 2/3 keer het aantal y-bogen (32). Deze formule geldt zowel voor het gebruik van trips van één klant, twee klanten en drie klanten en verkort de runtijd in LINGO.

$$y(i,i) = 0 \quad \forall i \in P \quad (33)$$

$$y(i,j) = 0, y(j,i) = 0 \quad \forall i \leq 7, j \geq 8 \quad \forall i,j \in P \quad (34)$$

$$y(i,j) + y(j,i) \leq 1 \quad \forall i,j \in P, i \neq j \quad (35)$$

$$y(i,j) + y(j,k) + y(k,i) \leq max_parcels - 1 \quad \forall i,j,k \geq 8, \in P, i \neq j \neq k \quad (36)$$

$$y(i,j) + y(j,i) \leq max_parcels - 1 \quad \forall i,j \geq 8, \in P, i \neq j \quad (37)$$

Deze beperkingen garanderen de correcte trips van de drone tussen klanten. Deze restricties hebben dus enkel betrekking op de binaire y-variabele. Beperking (33) zegt dat de drone niet van een klant naar dezelfde klant mag vliegen. De volgende beperking (34) duidt aan dat er met een y-verbinding enkel vluchten mogen zijn tussen klanten, en niet met een vrachtwagenknooppunt. Beperking (35) specificeert dat er geen heen-en-terug verbindingen mogen zijn tussen klanten, terwijl de volgende beperking (36) zegt dat er geen subtour tussen drie klanten mag bestaan. Dit is een trip waarbij één klant een inkomende en uitgaande y-boog heeft. Deze restrictie wordt enkel gebruikt wanneer $max_parcels = 3$. Wanneer deze parameter op 2 wordt gezet, moet de restrictie (36) uitgeschakeld en wordt restrictie (37) in de plaats gebruikt. Voor $max_parcels = 1$ mogen beide restricties genegeerd worden.

$$z(i,j) = 0 \quad \forall i,j \in P, i,j \geq 8 \quad (38)$$

$$\sum_{j \geq 8} z(i,j) = \sum_{j \geq 8} z(j,i) \quad \forall i \in P \quad (39)$$

$$z(i, start_depot) = 0 \quad (40)$$

$$z(i, end_depot) = 0 \quad \forall i \in P \quad (41)$$

$$z(start_depot, i) = 0 \quad (42)$$

$$z(end_depot, i) = 0 \quad \forall i \in P \quad (43)$$

$$z(i, i) = 0 \quad \forall i \in P \quad (44)$$

$$z(i, k) + y(k, l) + y(l, m) + z(l, j) \leq 3 \quad \forall i, j, k, l, m: i, j \leq 7, k, l, m \geq 8 \quad (45)$$

$$z(i, k) + y(k, l) + z(l, i) \leq 2 \quad \forall i, j, k, l, m: i, j \leq 7, k, l, m \geq 8 \quad (46)$$

$$z(n1, j) + z(j, n2) \leq 1 \quad \forall n1, n2, j: node1, node2 \leq 7, i \geq 8 \quad (47)$$

Deze beperkingen hebben toepassing op de binaire variabele z , en heeft dus betrekking op de vluchten van de drone tussen klant- en vrachtwagenknooppunten. Beperking (38) zegt dat er geen z -verbindingen mogen bestaan tussen klanten onderling. De volgende beperking (39) duidt aan dat het aantal vertrekken van de drone uit een klantknooppunt hetzelfde moet zijn aan het aantal aankomsten met een drone. De volgende vier restricties verbieden de bewegingen met variabele z richting of uit een startepot of einddepot (40-43). De drone mag enkel aankomen bij klanten of vrachtwagenknooppunten. Vervolgens mag er geen dronetrip zijn van een vrachtwagenknooppunt of klant naar eenzelfde vrachtwagenknooppunt of klant (44). De laatste drie beperkingen (45-47) van deze categorie elimineren de drone trips die vertrekken van een bepaald vrachtwagenknooppunt, en terug aankomen in een ander vrachtwagenknooppunt. Ook bij deze beperkingen wordt een gevalsonderscheiding gemaakt, afhankelijk van hoeveel parcels er toegelaten zijn per dronevlucht. Het vertrekken van een vrachtwagenknooppunt en arriveren bij een ander vrachtwagenknooppunt mag nooit voorkomen; niet bij een dronetrip met 3 klanten (45) (2 y -variabelen) en niet bij 2 klanten (46) (1 y -variabel). In beperking (47) wordt dit geëlimineerd voor het geval met één klant. Deze beperkingen voorkomen verboden trips van de drone.

Voor alle $n, c1, c2, c3$ met $c1 \neq c2 \neq c3$:

$$\begin{cases} loop_used(n, c1, c2, c3) \leq z_{n,c1} \\ loop_used(n, c1, c2, c3) \leq y_{c1,c2} \\ loop_used(n, c1, c2, c3) \leq y_{c2,c3} \\ loop_used(n, c1, c2, c3) \leq z_{c3,n} \\ loop_used(n, c1, c2, c3) \geq z_{n,c1} + y_{c1,c2} + y_{c2,c3} + z_{c3,n} - 3 \end{cases} \quad (48)$$

Voor alle $n, c1, c2, c3$ met $c1 \neq c2 = c3$:

$$\begin{cases} loop_used(n, c1, c2, c3) \leq z_{n,c1} \\ loop_used(n, c1, c2, c3) \leq y_{c1,c2} \\ loop_used(n, c1, c2, c3) \leq z_{c2,n} \\ loop_used(n, c1, c2, c3) \geq z_{n,c1} + y_{c1,c2} + z_{c2,n} - 2 \end{cases} \quad (49)$$

Voor alle $n, c1, c2, c3$ met $c1 = c2 = c3$:

$$\begin{cases} loop_used(n, c1, c2, c3) \leq z_{n,c1} \\ loop_used(n, c1, c2, c3) \leq z_{c1,n} \\ loop_used(n, c1, c2, c3) \leq z_{n,c1} + z_{c1,n} - 1 \end{cases} \quad (50)$$

Deze beperkingen geven de formules voor de trips die gemaakt worden naar klanten door de drone. Het gebruik van deze beperkingen is afhankelijk van het toegelaten aantal klanten per dronevlucht. Het eerste geval (48) dwingt af of de trip van een node naar een combinatie van drie klanten ($c1, c2, c3$) gemaakt wordt of niet. Wanneer al de binaire variabelen aan de rechterzijde gelijk zijn aan één, zal de trip tussen (i, k, l, m) gemaakt worden, waarbij i een node voorstelt en i, k, m de drie klanten die bezocht worden. Dezelfde redenering geldt voor de gevallen waarbij er twee of één klant in een trip bezocht worden. Voor het geval met twee klanten (49) is er enkel één mogelijke combinatie van klanten om $loop_used$ gelijk aan één te stellen. Dit is wanneer $c1 \neq c2 = c3$. Voor het geval dat $k=l \neq m$, zal de loop nooit gebruikt worden omdat dit niet in de definitie van een trip met twee klanten zit. Het geval met één klant wordt gegeven door restrictie (50).

$$X_{ij} \text{ is binair en niet - negatief } \forall i, j \in P \quad (51)$$

$$Y_{ij} \text{ is binair en niet - negatief } \forall i, j \in P \quad (52)$$

$$Z_{ij} \text{ is binair en niet - negatief } \forall i, j \in P \quad (53)$$

$$loop_used(i, j, k, l) \text{ is binair en niet - negatief } \forall i \leq 7, \forall j, k, l \geq 8 \quad (54)$$

4. Resultaten empirisch deel

In deze sectie worden de resultaten van het empirisch deel besproken. Hiervoor worden de 81 gebruikte opstellingen geanalyseerd aan de hand van de drie analyses die eerder vermeld zijn. De resultaten worden besproken aan de hand van verschillende tabellen. In deze tabellen worden volgende afkortingen gehanteerd:

- Batterij_c = De gebruikte batterijcapaciteit in uur (0.3, 0.4, 0.5).
 - Max_p = Het maximaal aantal toegelaten parcels (klanten) dat per dronevlucht geleverd mag worden (1, 2, 3).
 - V_t = De snelheid van de vrachtwagen in km/u (10, 20, 30).
 - V_d = De snelheid van de drone in km/u (40, 50, 60).
 - NFS = No Feasible Solution. Voor de gebruikte parameterwaarden is er geen route mogelijk om aan alle beperkingen te voldoen.
- Analyse 1: Effect van de batterijcapaciteit op de makespan en de routestructuur

In tabel 9 wordt een overzicht getoond van de makespan voor alle 81 scenario's. Een opvallende observatie is het voorkomen van "NFS" (Not Feasible Solution) bij lage batterijcapaciteit (0,3 uur) en lage dronesnelheid (40 km/u). Dit geeft aan dat het systeem geen oplossing kan vinden, omdat de drone onvoldoende afstand kan afleggen om één van de klanten te bereiken. Bij hogere batterijcapaciteit en hogere snelheden verdwijnt dit probleem, wat wijst op een minimale drempel voor batterijcapaciteit en snelheid om het probleem oplosbaar te maken.

V _t	V _d	Batterij _c = 0.3			Batterij _c = 0.4			Batterij _c = 0.5		
		Max _p = 1	2	3	Max _p = 1	2	3	Max _p = 1	2	3
10	40	NFS	NFS	NFS	7.755	7.705	7.705	7.755	7.563	7.450
	50	8.264	8.264	8.264	7.426	7.259	7.170	5.753	5.463	5.463
	60	7.207	7.067	7.067	5.423	5.164	5.164	5.423	4.944	4.903
20	40	NFS	NFS	NFS	4.816	4.766	4.766	4.816	4.624	4.519
	50	4.911	4.865	4.865	4.487	4.320	4.231	3.986	3.695	3.695
	60	4.268	4.128	4.128	3.655	3.396	3.396	3.655	3.176	3.135
30	40	NFS	NFS	NFS	3.836	3.787	3.787	3.836	3.644	3.540
	50	3.749	3.703	3.703	3.507	3.340	3.251	3.392	3.106	3.106
	60	3.288	3.148	3.148	3.066	2.807	2.807	3.066	2.587	2.545

Tabel 9: Overzicht makespan 81 opstellingen

Verder zien we een duidelijke daling in makespan wanneer de batterijcapaciteit stijgt. Deze daling wordt beter toegelicht tabel 9, waar de gemiddelde makespan wordt getoond per batterijcapaciteit.

Batterij_c	0.3	0.4	0.5
Gem_Makespan	5.22	4.77	4.40

Tabel 10: Gemiddelde makespan per batterijcapaciteit

Tabel 9 weergeeft de gemiddelde makespan bij een batterijcapaciteit van respectievelijk 18 minuten, 24 minuten en 30 minuten. De gemiddeldes werden berekend over alle snelheden van beide voertuigen en het aantal parcels (klanten) dat toegelaten werd per dronevlucht. Het is duidelijk dat een hogere batterijcapaciteit de totale reistijd vermindert. De makespan daalt met 8.62% wanneer de batterijcapaciteit van 18 minuten verhoogt wordt tot 24 minuten. Wanneer deze verhoogt wordt tot 30 minuten, daalt de makespan met 15.71% ten opzichte van 18 minuten.

Vervolgens werd het effect van een hogere batterijcapaciteit op de structuur van de route onderzocht. De structuur van de route wordt onderverdeeld in het gemiddeld aantal dronevluchten, het gemiddeld aantal klanten per vlucht en het gemiddeld aantal vrachtwagenstops dat gebruikt wordt. De gemiddeldes werden weer berekend over alle verschillende snelheden van beide voertuigen en het aantal parcels (klanten) dat toegelaten werd per dronevlucht. Tabel 10 geeft een overzicht van de resultaten.

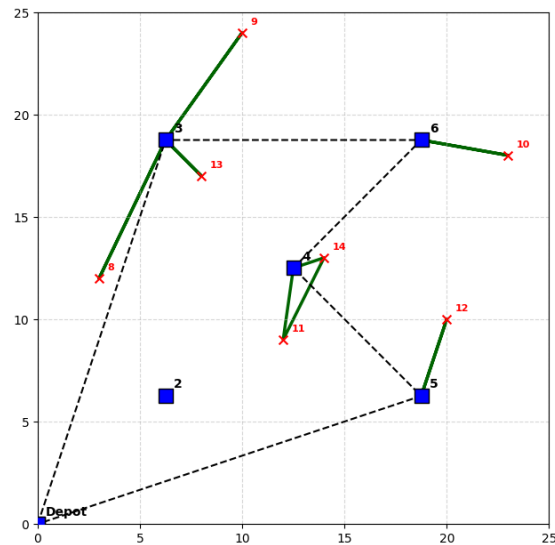
batterij_c	0.3	0.4	0.5
Gem_#dronevluchten	6.11	5.56	5.11
Gem_#klant/vlucht	1.17	1.33	1.46
Gem_#stops	3.83	3.11	2.44

Tabel 11: Structuur van de route (gemiddelden)

Deze resultaten tonen duidelijk dat een verhoging in batterijcapaciteit een groot effect heeft op de structuur van de route. Ten eerste daalt het gemiddelde aantal dronevluchten bij een hogere batterijcapaciteit van 6,11 vluchten tot 5,11 vluchten. De oorzaak hiervan is te vinden bij het stijgend gemiddelde aantal klanten dat er bezocht wordt per dronevlucht. Hiernaast is er een daling in het aantal vrachtwagenknooppunten dat bezocht wordt door de vrachtwagen. Aangezien de vrachtwagen trager is dan de drone, is dit zeer voordelig voor het verminderen van de reistijd.

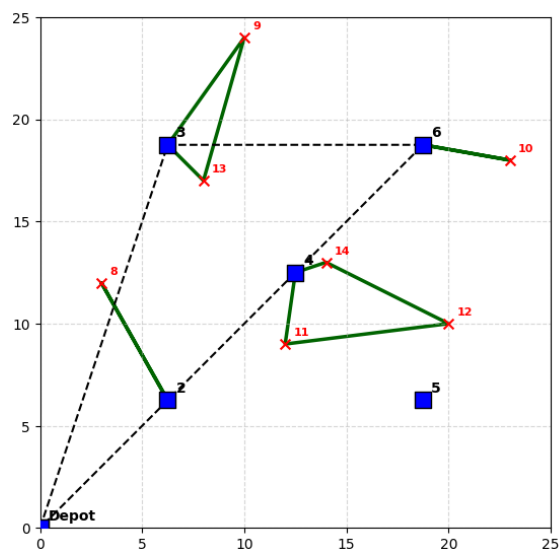
Hieronder worden enkele routes weergegeven om de vorige bevindingen te visualiseren. De vrachtwagenroute wordt getoond aan de hand van een zwarte stippellijn en de dronevluchten aan de hand van een donkergroene lijn. Bij deze getoonde opstellingen werd de batterijcapaciteit verhoogd van 0,3 uur naar 0,4 uur en 0,5 uur, terwijl de andere parameters constant blijven. Er is gekozen voor de volgende waarden, aangezien er een duidelijke verandering van de route gebeurde bij het verhogen van de batterijcapaciteit. In enkele gevallen is er namelijk geen verandering in de route bij een verhoging in batterijcapaciteit.

- Max_parcel = 3
- $V_t = 20$
- $V_d = 50$
- Batterijcapaciteit = 0.3, 0.4, 0.5 uur



Figuur 11: Route voor $B=0.3$, $V_t=20$, $V_d=50$, $Maxp=3$

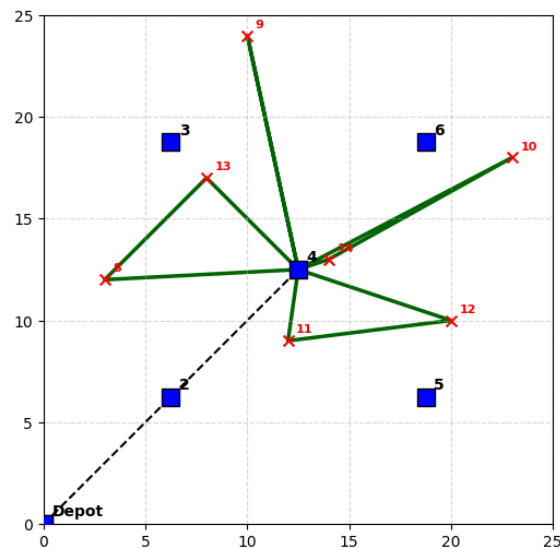
Bij een batterijcapaciteit van 0,3 uur wordt de vrachtwagen gedwongen om de vier verst liggende vrachtwagenknooppunten te bezoeken, aangezien het bereik van de drone niet volstaat om enkele klanten te bezoeken vanuit een dichter vrachtwagenknooppunt. Dit zorgt voor een hoog vrachtwagengebruik. De zes vluchten van de drone bevatten één of twee klanten. Hoewel de opstelling een trip van drie klanten toelaat, kan dit niet gerealiseerd worden met deze batterijcapaciteit. Voor dit scenario bedraagt de makespan 4,865 uur.



Figuur 12: Route voor $B=0.4$, $V_t=20$, $V_d=50$, $Maxp=3$

Wanneer de batterijcapaciteit stijgt tot een duur van 0,4 uur, moet de vrachtwagen het vrachtwagenknooppunt 5 niet meer bezoeken, zoals weergegeven in figuur 12. In deze opstelling

volstaat de batterijcapaciteit van de drone om klant 12 te bezoeken vanuit het centraal gelegen vrachtwagenknooppunt. De drone maakt daarbij een trip waarbij drie klanten bezocht worden, wat zeer efficiënt is. Er worden vier dronevluchten gemaakt en nog steeds vier vrachtwagenknooppunten bezocht door de vrachtwagen. De makespan van deze opstelling bedraagt 4,231 uur.



Figuur 13: Route voor $B=0.5$, $V_t=20$, $V_d=50$, $Maxp=3$

Ten slotte wordt de batterijcapaciteit verhoogd tot 0,5 uur, weergegeven in figuur 13. Bij deze batterijcapaciteit kan de drone verschillende klanten combineren in één vlucht. Hierdoor moet de vrachtwagen enkel naar het centraal gelegen knooppunt rijden en terug naar het depot. De drone, die een hogere snelheid heeft, kan alle klanten bedienen vanuit vrachtwagenknooppunt 4. De makespan bij deze opstelling is 3,695 uur.

- Analyse 2: Het effect van de batterijcapaciteit en de vrachtwagen- en dronesnelheid op het gebruik van de vrachtwagen en drone

In deze analyse wordt het effect van de batterijcapaciteit en de snelheden van de voertuigen op het gebruik van vrachtwagen-drone onderzocht. Er worden twee tabellen met resultaten van het VRPD-model gegeven om inzicht te krijgen in de impact van batterijcapaciteit ($Batterij_c$), trucksnelheid (V_t) en dronesnelheid (V_d) op het gebruik van de vrachtwagen en drone. Tabel 12 toont het tijdsgebruik van de voertuigen en tabel 13 de afgelegde afstand per voertuig. Hierbij werd er een gemiddelde berekend over het toegelaten aantal parcels per vlucht (max_p).

Tabel 12 toont de makespan, de reistijd van zowel de vrachtwagen (TTT) als de drone (TDT), en het percentage van de tijd dat door de drone wordt benut (%dronetijd). De proportie van de makespan waarbij de vrachtwagen gebruikt wordt is logischerwijs $1 - \%dronetijd$. Hieruit blijkt dat zowel een hogere batterijcapaciteit als een hogere dronesnelheid leiden tot een lagere makespan, maar ook tot een verschillend tijdsgebruik van de voertuigen. Bijvoorbeeld, bij een vrachtwagensnelheid van

10 km/u en een dronesnelheid van 50 km/u, daalt de makespan van 8,264 uur naar 5,56 uur wanneer de batterijcapaciteit stijgt van 0,3 uur naar 0,5 uur. Tegelijkertijd stijgt het %dronetijd van de makespan van 21,91% naar 36,36%. Bij een hogere dronesnelheid (60 km/u) is dit effect nog sterker: de makespan daalt van 7,110 uur naar 5,090 uur, en het %dronetijd stijgt van 17,36% naar 30,39%. Dit wijst erop dat drones efficiënter kunnen opereren wanneer ze sneller zijn en over langere afstanden kunnen vliegen, wat resulteert in een kortere makespan.

V_t	V_d	Batterij_c = 0.3				Batterij_c = 0.4				Batterij_c = 0.5			
		Makespan	TTT	TDT	%Dronetijd	Makespan	TTT	TDT	%Dronetijd	Makespan	TTT	TDT	%Dronetijd
10	40	NFS	NFS	NFS	NFS	7.722	5.878	1.844	23,88%	7.589	5.878	1.711	22,53%
	50	8.264	6.453	1.811	21,91%	7.285	5.878	1.407	19,30%	5.560	3.536	2.024	36,36%
	60	7.110	5.878	1.232	17,36%	5.250	3.536	1.714	32,62%	5.090	3.536	1.554	30,39%
20	40	NFS	NFS	NFS	NFS	4.783	2.939	1.844	38,55%	4.653	2.939	1.714	36,79%
	50	6.502	3.485	3.017	46,38%	4.346	2.939	1.407	32,33%	3.792	1.768	2.024	53,32%
	60	4.175	2.939	1.236	29,58%	3.482	1.768	1.714	49,17%	3.322	1.768	1.554	46,52%
30	40	NFS	NFS	NFS	NFS	3.803	1.959	1.844	48,49%	3.673	1.959	1.714	46,61%
	50	3.718	2.324	1.394	37,51%	3.366	1.959	1.407	41,74%	3.201	1.300	1.901	59,53%
	60	3.195	1.959	1.236	38,65%	2.893	1.179	1.714	59,18%	2.733	1.179	1.554	56,55%

Tabel 12: Overzicht tijdsverdeling drone-truck

Ook de voertuigsnelheden zelf hebben een duidelijke impact op de prestaties. Een hogere vrachtwagensnelheid leidt systematisch tot een kortere maaktijd, ongeacht de batterijcapaciteit of dronesnelheid. Daarnaast blijkt dat een hogere dronesnelheid vooral effect heeft bij hogere batterijcapaciteiten. Dit komt doordat een snellere drone dan daadwerkelijk haar snelheid kan benutten om verder gelegen klanten te bereiken.

In tabel 13 wordt een soortgelijke analyse gemaakt, maar dan op vlak van afstand. In de kolommen staan de totale afstand van de route (tot_D), de afgelegde afstand door de vrachtwagen (D_truck) en de afgelegde weg van de drone (D_drone). Hier geeft de laatste kolom van elke batterijcapaciteit aan hoeveel procent van de totale afstand afgelegd werd door de drone (%Drone_D). Uiteraard is de proportie afgelegde afstand door de vrachtwagen gelijk aan $1 - \%Drone_D$. Door de gegevens te analyseren, kunnen we trends en optimalisatiemogelijkheden identificeren, maar ook enkele onduidelijkheden constateren.

V_t	V_d	Batterij_c = 0.3				Batterij_c = 0.4				Batterij_c = 0.5			
		tot_D	D_truck	D_drone	%Drone_D	tot_D	D_truck	D_drone	%Drone_D	tot_D	D_truck	D_drone	%Drone_D
10	40	NFS	NFS	NFS	NFS	132.53	58.78	73.75	55.64%	127.35	58.78	68.57	53.84%
	50	155.08	64.53	90.55	58.39%	129.13	58.78	70.35	54.49%	136.59	35.36	101.23	74.11%
	60	132.92	58.78	74.14	55.78%	138.26	35.36	102.90	74.43%	128.62	35.36	93.26	72.51%
20	40	NFS	NFS	NFS	NFS	132.53	58.78	73.75	55.64%	127.33	58.78	68.55	53.84%
	50	139.72	69.70	70.02	50.11%	129.13	58.78	70.35	54.49%	136.59	35.36	101.23	74.11%
	60	132.92	58.78	74.14	55.78%	138.26	35.36	102.90	74.43%	128.62	35.36	93.26	72.51%
30	40	NFS	NFS	NFS	NFS	132.52	58.78	73.75	55.64%	127.34	58.77	68.57	53.84%
	50	139.43	69.71	69.72	50.00%	129.12	58.77	70.35	54.49%	134.11	39.01	95.10	70.91%
	60	132.91	58.78	74.14	55.78%	138.27	35.37	102.90	74.43%	128.63	35.37	93.26	72.51%

Tabel 13: Overzicht afstandsverdeling drone-truck

Tabel 13 toont de resultaten op het voertuiggebruik met betrekking tot afstanden. Over het algemeen leidt een hogere batterijcapaciteit tot een groter aandeel dronegebruik in de totale

afstand. Zo stijgt bij $V_t=10$ km/u en $V_d=50$ km/u de droneafstand van 58,39% bij 0,3 uur batterijcapaciteit naar 74,11% bij 0,5 uur. Dit patroon is consistent in vergelijkingen tussen 0,3 uur en 0,5 uur. Opvallend is echter dat het gebruik van de drone qua tijd soms onverwachts daalt wanneer de batterijcapaciteit toeneemt van 0,4 uur naar 0,5 uur. Bij $V_d=40$ daalt het %dronetijd bij $V_t = 10$ van 23,88% naar 22,53%, en het %droneafstand van 55,64% naar 53,84%. Mogelijke verklaringen hiervoor zijn route-optimalisaties waarbij de drone met een grotere batterij efficiëntere, kortere vluchten uitvoert, vertrekkende van een ander vrachtwagenknooppunt. Het model wordt dan minder afhankelijk van het inzetten van de drone op lange trajecten als andere logistieke keuzes gunstiger blijken.

Interessant is ook dat de totale afstand doorgaans niet daalt bij een hogere batterijcapaciteit. De drone legt meestal een groter deel van de afstand af dankzij haar hogere snelheid, terwijl de truckafstand afneemt. Dit komt doordat de drone vaker zelfstandig klanten kan bedienen over langere afstanden, zonder gebruik van een nabijgelegen vrachtwagenknooppunt. Omdat de truck geen klanten bedient maar slechts als lanceerplatform dient, is het logisch dat bij optimale inzet van de drone de afhankelijkheid van de truck wordt verminderd. Dit bevestigt de bevindingen van Nguyen et al. (2019) die toegelicht werden in sectie 2.5.2 van de literatuurstudie.

Optimalisatiekansen liggen vooral in het verhogen van de batterijcapaciteit en de dronesnelheid. Een batterijcapaciteit van 0,5 uur levert in vrijwel alle gevallen betere resultaten op in termen van reistijd en dronegebruik. Dit suggereert dat investeringen in betere batterijen een kosteneffectieve manier kunnen zijn om de efficiëntie van het systeem te verhogen. Daarnaast blijkt dat het verhogen van de batterijcapaciteit meer impact heeft bij een hoge dronesnelheid dan bij een lage dronesnelheid. Een snellere vrachtwagen kan ook zeer tijdsbesparend zijn, dit aspect is echter afhankelijk van de het verkeer in de stad en kan dus niet zomaar stijgen.

- Analyse 3: Het effect van het aantal parcels per dronevlucht op de makespan en de routestructuur en de rol van de batterijcapaciteit hierbij

In deze analyse wordt het effect van het aantal klanten (parcels) per dronevlucht op de makespan en de routestructuur onderzocht en de rol van batterijcapaciteit hierbij. Eerst werd er een onderzoek gedaan naar het effect op de makespan en de structuur van de route. Vervolgens werd het effect op het gebruik van de vrachtwagen en drone onderzocht. Er wordt steeds een gemiddelde berekend over alle verschillende snelheden van beide voertuigen.

Batterij_c	Max_p = 1			Max_p = 2			Max_p = 3		
	Makespan	Gem.#trips	Gem.#stops	Makespan	Gem.#trips	Gem.#stops	Makespan	Gem.#trips	Gem.#stops
0.3	5.281	7	3.833	5.196	5.67	3.833	5.196	5.67	3.833
0.4	4.886	7	3.33	4.727	5	3	4.697	4.67	3
0.5	4.631	7	2.778	4.311	4.33	2.333	4.262	4	2.222

Tabel 14: Makespan & routestructuur per batterijcapaciteit en aantal parcels

Tabel 14 biedt inzicht in het effect van de batterijcapaciteit en het toegelaten aantal parcels per vlucht op de makespan, het gemiddelde aantal dronevluchten en het gemiddelde aantal knooppunten dat de vrachtwagen bezoekt. De gegevens zijn onderverdeeld naar batterijcapaciteit (0.3, 0.4 en 0.5 uur) en het aantal toegelaten bezoeken per dronevlucht ($\text{Max}_p = 1, 2 \text{ en } 3$), waarbij Max_p het aantal klantenbezoeken per vlucht aangeeft en de truck geen klanten mag bezoeken.

Bij een batterijcapaciteit van 0,4 uur is de makespan het hoogst: 4,886 uur voor $\text{Max}_p = 1$, 4,727 uur voor $\text{Max}_p = 2$ en 4,697 uur voor $\text{Max}_p = 3$. Het gemiddelde aantal dronevluchten blijft constant op 7 voor $\text{Max}_p = 1$, wat logisch is wanneer er maar één klant per vlucht bezocht mag worden (single-visit), maar daalt naar 5 en 4,67 respectievelijk bij $\text{Max}_p = 2$ en 3, wat aantoonst dat meer klantbezoeken per vlucht het aantal benodigde vluchten vermindert. Het gemiddelde aantal knooppunten dat de vrachtwagen bezoekt daalt wanneer de batterijcapaciteit stijgt en ook wanneer er meer parcels toegelaten zijn per dronevlucht.

Een duidelijk patroon is dat de makespan afneemt naarmate de batterijcapaciteit toeneemt en het aantal toegelaten klantbezoeken per vlucht stijgt (van $\text{Max}_p = 1$ naar 3). Dit wijst erop dat een hogere batterijcapaciteit en het combineren van meerdere klantbezoeken de makespan verkort en de bezorging efficiënter maakt. Het aantal knooppunten dat de vrachtwagen bezoekt daalt ook licht bij hogere batterijcapaciteiten en meer bezoeken, wat suggereert dat de vrachtwagen minder vaak hoeft te stoppen of een efficiëntere route kan volgen als de drone meer werk overneemt. In tabel 15 en 16 zoomen we hier verder op in.

Batterij_c	Max_p = 1			Max_p = 2			Max_p = 3		
	TTT	TDT	%dronetijd	TTT	TDT	%dronetijd	TTT	TDT	%dronetijd
0.3	3.400	1.441	29.77%	3.840	1.356	26.10%	3.840	1.356	26.10%
0.4	3.115	1.771	36.24%	3.115	1.612	34.09%	3.115	1.583	33.71%
0.5	2.678	1.953	42.17%	2.638	1.674	38.82%	2.638	1.625	38.14%

Tabel 15: Tijdsverdeling per batterijcapaciteit en aantal parcels

Batterij_c	Max_p = 1			Max_p = 2			Max_p = 3		
	D_truck	D_drone	%drone-D	D_truck	D_drone	%drone-D	D_truck	D_drone	%drone-D
0.3	63.38	78.71	55.37%	63.38	73.75	53.72%	63.38	73.75	53.78%
0.4	50.97	88.57	63.04%	50.97	79.96	60.96%	50.97	78.47	60.41%
0.5	44.38	97.69	68.35%	43.17	82.77	65.69%	43.17	80.56	64.96%

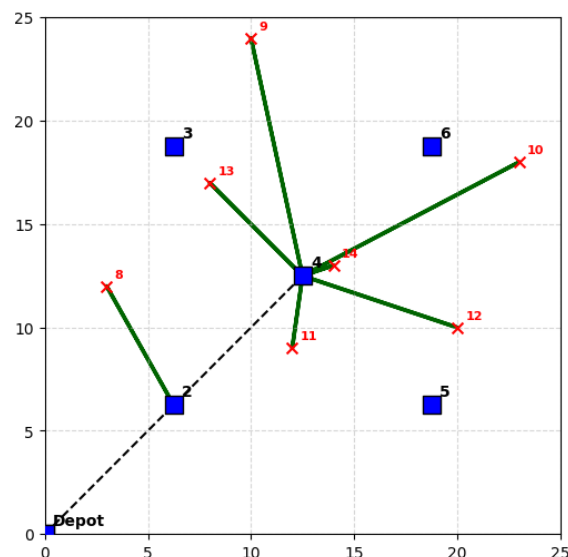
Tabel 16: Afstandsverdeling per batterijcapaciteit en aantal parcels

De analyse van tabel 15 en 16 onthult verschillende inzichten in de wisselwerking tussen drone- en vrachtwagengebruik. Naarmate de batterijcapaciteit van de drone toeneemt van 0,3 uur naar 0,5 uur, is er een merkbaar verbetering in de prestatie-metrics: zowel de totale dronetijd (TDT) als de afstand die de drone aflegt (D_Drone) nemen toe, terwijl de totale vrachtwagentijd (TTT) en de afstand die de vrachtwagen aflegt (D_truck) afnemen. Deze verschuiving benadrukt de groeiende rol van de drone, vooral wanneer verbeterde batterijtechnologie langere vluchten mogelijk maakt.

Het aantal bezoeken per dronevlucht, aangeduid met $Max_p = 1, 2 \text{ of } 3$, speelt ook een belangrijke rol in de algehele efficiëntie. Wanneer de drone meerdere klanten in één vlucht kan bedienen, nemen de totale tijd en afstand die nodig zijn voor leveringen af, zelfs al kunnen individuele drone-metrics zoals TDT en D_Drone afnemen. Dit wijst erop dat vluchten met meerdere bezoeken efficiënter gebruik maken van middelen door overbodige trips te verminderen. Daarnaast bieden %drone-afstand en %dronetijd inzichten in de bijdrage van de drone aan de operatie. Bijvoorbeeld, met een batterijcapaciteit van 0.5 en $Max_p = 1$, is de drone verantwoordelijk voor 68,35% van de totale afstand, maar neemt hij slechts 42,17% van de totale tijd in beslag. Dit verschil laat zien hoe efficiënt de drone afstanden snel kan overbruggen.

Deze percentages benadrukken hoe groot het aandeel van de drone is in de logistieke werklust, en bieden een duidelijke maatstaf voor zijn effectiviteit en potentiële voordelen, zoals het verminderen van vrachtwagengebruik, het verlagen van kosten of het minimaliseren van de milieu-impact. Samen tonen deze bevindingen het transformerende potentieel van drones in de logistiek aan, vooral wanneer een hogere batterijcapaciteit wordt gecombineerd met de mogelijkheid om meerdere klanten per vlucht te bedienen, wat hun sterke punten optimaal benut en de efficiëntie aanzienlijk verbetert door minder vluchten en vrachtwagenstops. Om deze bevindingen visueel te onderbouwen, worden hieronder enkele routes getoond waarbij het toegelaten aantal klanten per dronevlucht verschilt. Hiervoor worden de opstellingen gebruikt met de volgende parameters:

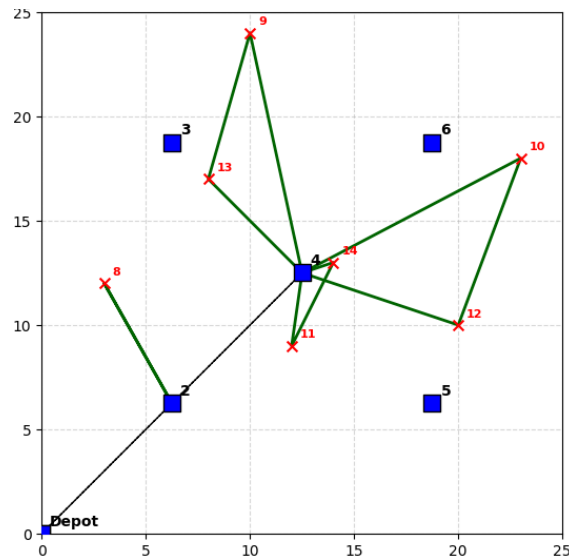
- $V_t = 30$
- $V_d = 60$
- Batterijcapaciteit = 0,5 uur
- $Max_p = 1, 2, 3$



Figuur 14: Route voor $B=0.5$, $V_t=30$, $V_d=60$, $Max_p=1$

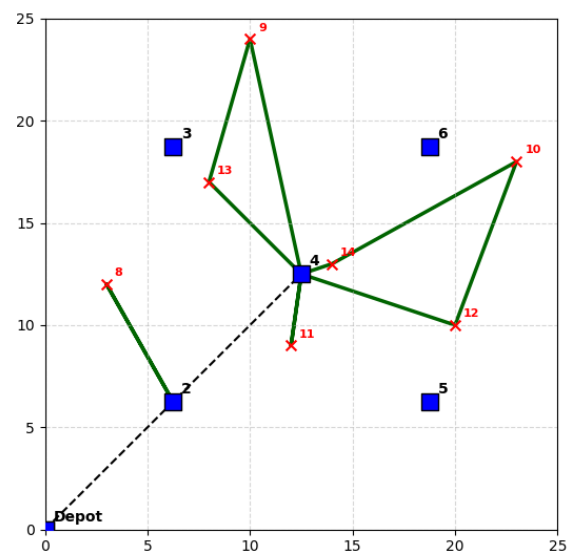
Bij een batterijcapaciteit van 0,5 uur en een dronesnelheid van 60 km/u kan de drone in totaal 30 km afleggen per vlucht. Dit is ruim voldoende om alle klanten te bereiken vanuit het centraal gelegen vrachtwagenknooppunt, en ook om meerdere klanten te combineren per vlucht. Dit is echter niet

toegelaten wanneer $Max_p = 1$. De makespan voor deze route bedraagt 3,066 uur, met een TDT van 1,887 uur en een totale afstand van 148,59 km. De route wordt gegeven in figuur 14.



Figuur 15: Route voor $B=0.5$, $V_t=30$, $V_d=60$, $Max_p=2$

Wanneer we voor de opstellingen max_p verhogen naar twee, worden er drie dronevluchten gemaakt waarbij twee klanten bediend worden per vlucht. Dit wordt weergegeven in figuur 15. Dit leidt, zoals besproken, tot een verlaging in de makespan en de totale afstand. De makespan voor deze route bedraagt 2,587 uur, met een TDT van 1,409 uur en een totale afstand van 119,91 kilometer.



Figuur 16: Route voor $B=0.5$, $V_t=30$, $V_d=60$, $Max_p=3$

Wanneer we ten slotte het maximaal toegelaten parcels per dronevlucht verhogen tot drie, wordt één vlucht gemaakt waarbij drie klanten bediend worden. Figuur 16 toont deze route. Bij deze opstelling bekomen we de optimale oplossing van alle 81 verschillende opstellingen. De makespan van de route 2,545 uur, met een TDT van 1,367 uur en een totale afstand van 117,39 km.

5. Conclusie

Drones bieden veelbelovende voordelen voor last-mile delivery, zoals het maken van snellere leveringen aan lagere operationele kosten ($\pm 20\%$), vermindering van verkeerscongestie en een positieve bijdrage aan duurzaamheid. Hierdoor zijn ze aantrekkelijk voor efficiënte en milieubewuste logistiek, wat steeds belangrijker wordt voor logistieke bedrijven. Technologische ontwikkelingen op het vlak van batterijcapaciteit, real-time gegevensuitwisseling en luchtverkeersbeheer (UTM) versterken het toekomstperspectief. Toch blijft grootschalige inzet op korte termijn beperkt door de publieke opinie, hoge investeringskosten, regelgeving en infrastructuurvereisten. Hierdoor zijn drones momenteel vooral geschikt voor niches zoals medische spoedleveringen of moeilijk bereikbare gebieden, maar met verdere technologische en regelgevende vooruitgang is bredere toepassing in stedelijke en e-commerce contexten op middellange termijn realistisch.

Hoewel drones aanzienlijke voordelen bieden voor last-mile delivery, staan er voor een grootschalige inzet nog diverse uitdagingen in de weg. De beperkte batterijcapaciteit beperkt het bereik en vraagt om frequente oplaadmomenten. Technologische innovaties, zoals geavanceerde batterijen, draadloze laadinfrastructuur en AI-gestuurde routeplanning, bieden perspectief maar zijn nog in ontwikkeling. Ook weersomstandigheden vormen een grote belemmering voor betrouwbaarheid en veiligheid. Daarnaast zijn infrastructuurtekorten, zoals het gebrek aan landingsplaatsen en dronehubs, en veiligheidsrisico's zoals accidenten of GPS-hacking kritieke aandachtspunten. Zonder robuuste luchtverkeerssystemen, zoals UTM, kunnen drones moeilijk opereren in complexe omgevingen. Verder zorgen strikte regelgeving, ethische bezwaren en een laag maatschappelijk draagvlak, onder meer door zorgen over privacy, geluid en aansprakelijkheid, voor extra barrières. Een succesvolle integratie van drones vraagt daarom om een gecoördineerde aanpak waarin technologische ontwikkeling, infrastructuur, regelgeving en publieke betrokkenheid gezamenlijk worden aangepakt.

Het VRPD (Vehicle Routing Problem with Drones) is een steeds relevanter model in de logistiek, vooral voor last-mile delivery, doordat het een efficiënte combinatie mogelijk maakt van vrachtwagens en drones. Door slimme routing kunnen bedrijven inspelen op de groeiende vraag naar snelle, flexibele en duurzame leveringen. De structuur van het VRPD, met centrale depots, mobiele hubs of parallelle routes, bepaalt in grote mate de efficiëntie, afhankelijk van de doelstellingen zoals kostenreductie, minimale uitstoot of maximale klanttevredenheid. Technologische vooruitgang in AI, batterijtechnologie en planning maakt het mogelijk om routes te optimaliseren en het energieverbruik te minimaliseren. Ondanks hoge initiële investeringen van drones tonen praktijkvoorbeelden aan dat het model rendabel kan zijn, zeker wanneer het wordt ingezet op schaal en in de juiste context. Zo vormt VRPD een veelbelovende oplossing voor de complexe routeringsuitdagingen van de hedendaagse stedelijke logistiek.

De batterijcapaciteit van de drone speelt een cruciale rol in de efficiëntie van het leveringssysteem, doordat een groter bereik leidt tot een minder aantal nodige truckstops, veranderingen in de routing en een kortere totale levertijd. Bij lage batterijcapaciteit moet de vrachtwagen vaker

ingrijpen om leveringen mogelijk te maken, terwijl bij hogere capaciteit de drone zelfstandig meer klanten kan bedienen, zeker wanneer meerdere leveringen per vlucht worden toegestaan. Hierdoor wordt het systeem minder afhankelijk van de snelheid en inzet van de vrachtwagen. Het effect van batterijcapaciteit wordt bovendien versterkt door de dronesnelheid en het toegestane aantal klanten per vlucht. Voor logistieke bedrijven betekent dit dat investeren in drones met hogere batterijcapaciteit en het faciliteren van meerdere leveringen per dronevlucht niet alleen operationele efficiëntie verhoogt en kosten drukt, maar ook bijdraagt aan duurzamere stedelijke logistiek.

Beperkingen van het onderzoek

Het uitgevoerde onderzoek toont duidelijke resultaten voor de gebruikte setting en parameters. Toch zijn er enkele beperkingen aan het onderzoek:

Ten eerste is de gebruikte methode in LINGO niet optimaal. Door het gebruik van 'lussen' als dronevluchten moet het programma zeer veel mogelijkheden berekenen, wat leidt tot een lange runtijd. Hiernaast is het aantal gebruikte klanten in de setting relatief laag. Een hoger aantal klanten zou de generaliseerbaarheid van de resultaten kunnen verhogen. Dit was echter niet mogelijk door een hoge runtijd bij de gebruikte methode in LINGO.

Enkele andere beperkingen van het onderzoek hebben betrekking tot de assumpties. Zo is het niet altijd realistisch dat een klant maar één pakketje bestelt. Hiernaast werd verplicht dat de drone na elke vlucht terugkeert naar het knooppunt van waar hij vertrok. Dit is vaak minder efficiënt dan de drone naar een volgend knooppunt te laten vliegen. Er werd gekozen voor deze beperking om de runtijd in LINGO te verminderen. Indien deze assumptie niet voldaan moest worden, zouden er veel meer mogelijkheden zijn per dronetrip.

Aanbevelingen voor verder onderzoek

Een eerste aanbeveling die gemaakt kan worden voor verder onderzoek is het optimaliseren van het algoritme in LINGO of een andere software. Hoewel het gebruikte model perfect werkt voor simpele opstellingen, met een relatief laag aantal klanten, kan het zeker verbeterd worden. Een algoritme dat minder mogelijkheden moet berekenen kan ook uitgebreid worden zodat er meer klanten in verwerkt worden en de resultaten meer generaliseerbaar zijn.

Het gebruikte model maakt enkele vereenvoudigingen, zoals vaste klantlocaties en het verplicht bezoeken van alle klanten door de drone. Realistischere toepassingen zouden kunnen werken met dynamische klantvraag en toegevoegde beperkingen die rekening houden met het volume en gewicht van de pakketjes. Dit zou namelijk invloed hebben op de batterijcapaciteit. Verder zou de integratie van weersomstandigheden en no-fly zones het model realistischer kunnen maken. Ten slotte zou verder onderzoek de grootte van de potentiële kostenbesparing en vermindering in uitstoot kunnen aantonen aan de hand van de tijdsbesparing die berekend wordt in deze masterproef.

Bibliografie

Abronzini, U., Attaianese, C., D'Arpino, M., Monaco, M. D., & Tomasso, G. (2019). *Cost Minimization Energy Control Including Battery Aging for Multi-Source EV Charging Station*. Electronics

ADLC. (2024). Supply Chain Award for the Start-up of the Year 2024. *ADLC*.

Agarwal, A., & Shankar, R. (2002). Analyzing alternatives for improvement in supply chain performance. *Emerald insight*

Ahmad, F., Saad Alam, M., Saad Alsaidan, I., & Shariff, S. M. (2020). Battery swapping station for electric vehicles: Opportunities and challenges. *IET smart grid*.

Akram, R. N., Markantonakis, K., Mayes, K., Habachi, O., Sauveron, D., Steyven, A., & Chaumette, S. (2017). *Security, Privacy and Safety Evaluation of Dynamic and Static Fleets of Drones*. IEEE

Alba, E. (with Luque, G., Chicano, F., Cotta, C., Camacho, D., Ojeda-Aciego, M., Montes, S., Troncoso, A., Riquelme, J., & Gil-Merino, R.). (2021). *Advances in Artificial Intelligence: 19th Conference of the Spanish Association for Artificial Intelligence*. Springer

Balassa, B. E., Koteczki, R., Lukács, B., & Buics, L. (2023). *Sustainability Aspects of Drone-Assisted Last-Mile Delivery Systems—A Discrete Event Simulation Approach*. Energies

Baldacci, R., Battarra, M., & Vigo, D. (2008). Routing a Heterogeneous Fleet of Vehicles. In B. Golden, S. Raghavan, & E. Wasil (Red.), *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges*. Springer

Berbeglia, G., Cordeau, J.-F., Gribkovskaia, I., & Laporte, G. (2007). Static pickup and delivery problems: A classification scheme and survey. Springer

Boyer, K. K., Prud'homme, A. M., & Chung, W. (2009). The last mile challenge: evaluating the effects of customer density and delivery window patterns. *Journal of business logistics*

Braekers, K. (2016). The vehicle routing problem: State of the art classification and review. *Industrial Engineering*.

Bräysy, O., & Gendreau, M. (2005). Vehicle Routing Problem with Time Windows, Part I: Route Construction and Local Search Algorithms. *Transportation Science*.

Breunig, U. (2019). *The electric two-echelon vehicle routing problem*. Computers & Operations Research

Bruni, M. E. (2023). *A machine learning optimization approach for last-mile delivery and third-party logistics*. Computers & Operations Research

Cameron, E. (2018). Skies Without Limits v2.0. *PWC UK*.

Campbell, J. F., Ii, D. C. S., & Zhang, J. (z.d.). *Strategic Design for Delivery with Trucks and Drones*. Supply chain analytics report SCMA

Carlsson, J. G., & Song, S. (2018). Coordinated Logistics with a Truck and a Drone. *Management Science*

- Cataldo-Díaz, C., Linfati, R., & Escobar, J. W. (2022). *Mathematical Model for the Electric Vehicle Routing Problem Considering the State of Charge of the Batteries*. Sustainability
- Cattaruzza, D. (2017). *Vehicle routing problems for city logistics*. EURO Journal on Transportation and Logistics
- Chiang, W.-C., Li, Y., Shang, J., & Urban, T. L. (2019). Impact of drone delivery on sustainability and cost: Realizing the UAV potential through vehicle routing optimization. *Applied Energy*
- Choi, D. S., Hong, K. J., Shin, S. D., Lee, C.-G., Kim, T. H., Cho, Y., Song, K. J., Ro, Y. S., Park, J. H., & Kim, K. H. (2021). Effect of topography and weather on delivery of automatic electrical defibrillator by drone for out-of-hospital cardiac arrest. *Scientific Reports*
- Clarke, R., & Bennett Moses, L. (2014). The regulation of civilian drones' impacts on public safety. *Computer Law & Security Review*
- Cordeau, J.-F., & Maischberger, M. (2012). A parallel iterated tabu search heuristic for vehicle routing problems. *Computers & Operations Research*
- Cornell, A. (2024, oktober). Consumer views of drone delivery: How soon can you get here? *McKinsey*.
- Custers, B. H. M., Oerlemans, J. J., & Vergouw, S. J. (2015). *Het gebruik van drones: Een verkennend onderzoek naar onbemande luchtvaartuigen*. Boom Juridische Uitgevers.
- Dantzig, & Ramser. (1959). *The Truck Dispatching Problem*. Management science
- Dastpak, M. (2024). *Dynamic routing for the Electric Vehicle Shortest Path Problem with charging station occupancy information*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies
- De jager, W. (2024). Zipline zet mijlpaal met miljoenste commerciële dronebezorging. *Dronewatch*.
- Desaulniers, G., Jacques Desreurs, & Francois Soumis. (2002). *VRP with Pickup and delivery*. Academia VRP
- Di Puglia Pugliese, L. (2019). *Using drones for parcels delivery process*. Procedia Manufacturing
- EASA. (2018). *EASA Basic Regulation and related Implementing and Delegated Regulations*.
- EASA. (2024). *Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems. Regulations (EU)*
- Eksioglu, B., Vural, A. V., & Reisman, A. (2009). The vehicle routing problem: A taxonomic review. *Industrial Engineering*.
- El Habti, O. (2024). *Electric vehicle routing problems: Hoe omspringen met beperkte batterijcapaciteit*.
- Elshaer, R., & Awad, H. (2020). A taxonomic review of metaheuristic algorithms for solving the vehicle routing problem and its variants. *Computers & Industrial Engineering*
- Erdelic, T., & Caric, T. (2019). *A Survey on the Electric Vehicle Routing Problem: Variants and Solution Approaches*. Journal of Advanced Transportation
- Eskandaripour, H., & Boldsai Khan, E. (2023). *Last-Mile Drone Delivery: Past, Present, and Future*. Drones

FAA. (2025). *Community Engagement Toolkits*.

Fontes, D. B. M. M., Hadjiconstantinou, E., & Christofides, N. (2006). A Branch-and-Bound Algorithm for Concave Network Flow Problems. *Journal of Global Optimization*

Frey, C. B., & Osborne, M. A. (2017). The future of employment: How susceptible are jobs to computerisation? *Technological Forecasting and Social Change*

Gao, M. (2021). Weather constraints on global drone flyability. *Scientific Reports*.

GDPR. (2016). *Algemene verordening gegevensbescherming (AVG)*

Gendreau, M., Ghiani, G., & Guerriero, E. (2015). Time-dependent routing problems: A review. *Computers & Operations Research*

Gendreau, M., & Tarantilis, C. (2010). Solving Large-Scale Vehicle Routing Problems with Time Windows; State of the art. *Cirrelt*.

Gerssen-Gondelach, S. J., & Faaij, A. P. C. (2012). Performance of batteries for electric vehicles on short and longer term. *Journal of Power Sources*

Ghalkhani, M., & Habibi, S. (2023). *Review of the Li-Ion Battery, Thermal Management, and AI-Based Battery Management System for EV Application*. *Energies*

Gharibi, M., Boutaba, R., & Waslander, S. L. (2016). Internet of Drones. *IEEE*

Goodchild, A., & Toy, J. (2018). Delivery by drone: An evaluation of unmanned aerial vehicle technology in reducing CO 2 emissions in the delivery service industry. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*

Gu, R. (2023). *Dynamic truck-drone routing problem for scheduled deliveries and on-demand pickups with time-related constraints*. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*

Ha, Q. M., Deville, Y., Pham, Q. D., & Hà, M. H. (2020). A hybrid genetic algorithm for the traveling salesman problem with drone. *Journal of Heuristics*

Hackmann, M. (2024, december 10). P3 Charging Index 2024. *P3*.

Hartmann, K., & Giles, K. (2020). The Next Generation of Cyber-Enabled Information Warfare. *2020 12th International Conference on Cyber Conflict (CyCon)*

Ho, S.-C., Kauffman, R. J., & Liang, T.-P. (2007). A growth theory perspective on B2C e-commerce growth in Europe: An exploratory study. *Electronic Commerce Research and Applications*.

Jayasooriya, & Bandara. (2017). *Measuring the economic costs of traffic congestion*. *Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon)*

Jazairy, A., & Persson, E. (2023). *Drones in last-mile delivery: A systematic literature review from a logistics management perspective*. *The International Journal of Logistics Management*

Joerss, M., Neuheus, F., & Schroder, J. (2016). *How customers demands are reshaping last mile delivery*. *The McKinsey Quarterly*

- Jones, T. (2017). *International Commercial Drone Regulation and Drone Delivery Services*. RAND Corporation.
- Kamarainen, V., Smaeros, J., Jaakola, T., & Holmstroem, J. (2001). Cost-effectiveness in the e-grocery business. *International Journal of Retail & Distribution Management*
- Kalaitzi, D., Matopoulos, A., & Bourlakis, M. (2019). *Supply chains under resource pressure. International Journal of Operations & Production Management*
- Karak, A. (2019). *The hybrid vehicle-drone routing problem for pick-up and delivery services*.
- Kim, G., Ong, Y. S., Heng, C. K., Tan, P. S., & Zhang, N. A. (2015). City Vehicle Routing Problem (City VRP): A Review. *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*
- Kim, J. J., Kim, I., & Hwang, J. (2021). A change of perceived innovativeness for contactless food delivery services using drones after the outbreak of COVID-19. *International Journal of Hospitality Management*
- Kucukoglu, I., Dewil, R., & Cattrysse, D. (2021). The electric vehicle routing problem and its variations: A literature review. *Computers & Industrial Engineering*
- Kumar, C., & Mohanty, S. (2021). Current Trends in Cyber Security for Drones. *2021 International Carnahan Conference on Security Technology (ICCST)*
- Kuo, R. J., Lu, S.-H., Lai, P.-Y., & Mara, S. T. W. (2022). Vehicle routing problem with drones considering time windows. *Expert Systems with Applications*
- Kyriakakis, N. A., Stamadianos, T., Marinaki, M., & Marinakis, Y. (2022). The electric vehicle routing problem with drones: An energy minimization approach for aerial deliveries. *Cleaner Logistics and Supply Chain*
- Laporte, & Nobert, Y. (1983). A branch and bound algorithm for the capacitated vehicle routing problem. *OR Spectrum*.
- Lee, W., Alkouz, B., Shahzaad, B., & Bouguettaya, A. (2021). Package Delivery Using Autonomous Drones in Skyways. *Adjunct Proceedings of the 2021 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and Proceedings of the 2021 ACM International Symposium on Wearable Computers*,
- Lin, C., Choy, K. L., Ho, G. T. S., Chung, S. H., & Lam, H. Y. (2014). Survey of Green Vehicle Routing Problem: Past and future trends. *Expert Systems with Applications*
- Liu, R., & Jiang, S. (2022). A variable neighborhood search algorithm with constraint relaxation for the two-echelon vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup demands. *Soft Computing*
- Lozzi, G., Iannaccone, G., Maltese, I., Gatta, V., Marcucci, E., & Lozzi, R. (2022). *On-Demand Logistics: Solutions, Barriers, and Enablers*. Sustainability
- Mahadevan, P. (2007). *Military use of drones*. CSS Analyses in Security Policy
- Martin, X. A., Escoto, M., Guerrero, A., & Juan, A. A. (2024). Battery Management in Electric Vehicle Routing Problems: A Review. *Energies*
- Mbabazi. (2017). The American Drones Saving Lives in Rwanda. *Time*.

- Mbiadou Saleu, R. G., Deroussi, L., Feillet, D., Grangeon, N., & Quilliot, A. (2022). The parallel drone scheduling problem with multiple drones and vehicles. *European Journal of Operational Research*
- McDonald, S. (2009). Changing climate, changing minds: applying the literature on media effects, public opinion, and the issue-attention cycle to increase public understanding of climate change. *International Journal of Sustainability Communication*
- McKinnon, A. C. (2016). Logistics and climate: An assessment of logistics' multiple roles in the climate crisis. *International Journal of Logistics Research and Applications*
- Mohammad, W. A., Diab, Y. N., Elomri, A., & Triki, C. (2023). *Innovative solutions in last mile delivery: Concepts, practices, challenges, and future directions*. Supply Chain Forum: An International Journal
- Mohsan, S. A. H. (2022). *Role of Drone Technology Helping in Alleviating the COVID-19 Pandemic*. Micromachines
- Montoya-Torres, J. R., López Franco, J., Nieto Isaza, S., Felizzola Jiménez, H., & Herazo-Padilla, N. (2015). A literature review on the vehicle routing problem with multiple depots. *Computers & Industrial Engineering*
- Murray, C. C. (2015). *The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies
- Murray, C. C., & Raj, R. (2020). The multiple flying sidekicks traveling salesman problem: Parcel delivery with multiple drones. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*
- Narayana, V. S., & Newton, P. D. (2013). Customer expectations of e-commerce. *International Journal of Business Economics & Management*
- Naumov, V., & Pawluś, M. (2021). *Identifying the Optimal Packing and Routing to Improve Last-Mile Delivery Using Cargo Bicycles*. Energies
- Nelis. (2024). In Genks distributiecentrum van IKEA werken orderpicker en drone als collega's naast elkaar. *Het Nieuwsblad*.
- Nguyen, N. T., Chbeir, R., Exposito, E., Aniorté, P., & Trawiński, B. (Red.). (2019). *Computational Collective Intelligence: 11th International Conference. Proceedings*, Springer International Publishing.
- Pessot, E., Zangiacomi, A., Marchiori, I., & Fornasiero, R. (2023). *Empowering supply chains with Industry 4.0 technologies to face megatrends*. Journal of Business Logistics
- Pillac, V., Gendreau, M., Guéret, C., & Medaglia, A. L. (2013). A review of dynamic vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*
- Poikonen. (2017). *The vehicle routing problem with drones: Extended models and connections*. Networks
- Poikonen, & Campbell. (2020). *Future directions in drone routing research*. Networks
- Ponza, A. (2016). *Optimization of drone-assisted parcel delivery*.
- PTV Logistics. (2025). Last Mile Delivery: Uitdagingen, oplossingen en het optimaliseren ervan. *PTV Logistics*.

- Raghunatha, A. (2023). Critical assessment of emissions, costs, and time for last-mile goods delivery by drones versus trucks. *Scientific Reports*.
- Rejeb, A., Rejeb, K., Simske, S. J., & Treiblmaier, H. (2023). Drones for supply chain management and logistics: A review and research agenda. *International Journal of Logistics Research and Applications*
- Saenz, H., Stephan, J., Terino, J., & Bysong, T. (2022, oktober). How to Trace a Path to Resilient, Sustainable Supply Chains. *Bain & Company*.
- Sanguesa, J. A., Torres-Sanz, V., Garrido, P., Martinez, F. J., & Marquez-Barja, J. M. (2021). A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges. *Smart Cities*.
- Service, R. (2018, maart 8). New generation of batteries could better power aerial drones, underwater robots. *Science*.
- SESAR. (2017). *U-space and urban air mobility*.
- Solove, D. (2021). *The myth of the privacy paradox*. Heinonline
- Sorbelli, F. B., Corò, F., Das, S. K., Palazzetti, L., & Pinotti, C. M. (2022). *Greedy Algorithms for Scheduling Package Delivery with Multiple Drones*. Proceedings of the 23rd International Conference on Distributed Computing and Networking
- Stamadianos, T., Kyriakakis, N. A., Giannoulakis, E., Marinaki, M., & Marinakis, I. (2025). *The Energy Minimizing Single-Drone Routing Problem with Pickups and Deliveries and Battery Replacement Stations*. SSRN
- Stanley, F. (2024, november 19). Cutting Last-Mile Delivery Costs. *MIT*.
- Taniguchi, E. (2016). New Opportunities and Challenges for City Logistics. *Transportation Research Procedia*.
- Tiwapat, N., Pomsing, C., & Jomthong, P. (2018). Last Mile Delivery: Modes, Efficiencies, Sustainability, and Trends. *2018 3rd IEEE International Conference on Intelligent Transportation Engineering*
- Toilier, F. (2016). How can Urban Goods Movements be Surveyed in a Megacity? The Case of the Paris Region. *Transportation Research Procedia*.
- Torabbeigi, M. (z.d.). *Drone Scheduling Optimization Considering Capacity and Reliability of Batteries*. University of Houston
- Toth, P., & Vigo, D. (Red.). (2002). *The vehicle routing problem*. Society for Industrial and Applied Mathematics. SIAM
- Tunnisaki, F. (z.d.). Clarke and Wright Savings Algorithm as Solutions Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup Delivery (VRPSPD). *Journal of Physics*.
- Uherek, E. (2010). Transport impacts on atmosphere and climate: Land transport. *Atmospheric Environment*.
- Vakulenko, Y. (2019). *Online retail experience and customer satisfaction: The mediating role of last mile delivery*. The International Review of Retail, Distribution and Consumer Research

- Van Hall, E. (2020, november 23). 26 e-commerce trends voor 'het nieuwe normaal' van 2021. *Emerce*.
- Villasenor, J. (2019). Liability Issues in Drone Delivery. *UCLA Law Review*.
- VMR. (2024). *Drones Market By Type (Commercial Drones, Military Drones), By Technology (Rotary Blade Drone, Hybrid Drone), By End-User (Real Estate And Construction, Security And Law Enforcement), And Region for 2024-2031*.
- Vos, J., & Tahtali, M. (2016). *E-commerce & Logistiek Literatuuronderzoek*. Kennisdlogistiek
- Wang, Y., Su, Z., Zhang, N., & Li, R. (2022). Mobile Wireless Rechargeable UAV Networks: Challenges and Solutions. *IEEE Communications Magazine*.
- Wang, Z., & Sheu, J. (2019). *Vehicle Routing Problem With Drones*. Transportation research part B: methodological
- WEF. (2020). *The Future of the Last-Mile Ecosystem*.
- Wild, G., Murray, J., & Baxter, G. (2016). *Exploring Civil Drone Accidents and Incidents to Help Prevent Potential Air Disasters*. Aerospace
- Wohlsen, M. (2014, juni 10). The Next Big Thing You Missed: Amazon's Delivery Drones Could Work—They Just Need Trucks. *Wired*.
- Xiao, Y., Zhang, Y., Kaku, I., Kang, R., & Pan, X. (2021). Electric vehicle routing problem: A systematic review and a new comprehensive model with nonlinear energy recharging and consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*
- Xie, S. (2024). Strategic Expectation Setting of Delivery Time on Marketplaces. *Information Systems Research*
- Yoo, W. (2018). Drone delivery_ Factors affecting the public's attitude and intention to adopt. *Telematics and Informatics*.
- Yperman, J. (2023, maart 14). *Het Jan Yperman Ziekenhuis test als eerste ziekenhuis in Europa een volledig geautomatiseerde drone logistiek uit dankzij 5G-netwerk in de Westhoek*.
- Zhang, S. (2023). The Multi-visits Drone-Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery Service. *Vehicle Routing Problem*. Journal of the Operations Research Society of China
- Zhang, X. Q. (2016). The trends, promises and challenges of urbanisation in the world. *Habitat International*.
- Zhu, T. (2021). *The capacitated vehicle routing problem with drones considering stochastic demands and restricted return trip*. 100th Annual Meeting of the Transportation Research Board
- Zhu, X., Cai, L., Lai, P.-L., Wang, X., & Ma, F. (2023). *Evolution, Challenges, and Opportunities of Transportation Methods in the Last-Mile Delivery Process*. Systems

Appendix

LINGO

```
SETS:
    P/1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14/: LX, LY, zsum;
    A(P,P): dist, x, y, z, TT;
    LOOP(P, P, P, P): TN, loop_used, loop_distance;
ENDSETS

! Parameters;
DATA:
    ! Number of customers;
    number_of_customers = 7;
    ! Coordinates for nodes (Depot 1, nodes 2,3,4,5,6, Depot 7, customers 8,9,10,11,12,13,14);
    LX = 0, 6.25, 6.25, 12.5, 18.75, 18.75, 0, 3, 10, 23, 12, 20, 8, 14;
    LY = 0, 6.25, 18.75, 12.5, 6.25, 18.75, 0, 12, 24, 18, 9, 10, 17, 13;
    ! Speeds (km/hour);
    SPEED_TRUCK = 10;
    SPEED_DRONE = 40;
    max_parcel = 3; !note: when changing this parameter: also change restriction with
2PARCEL_RESTR or 3PARCEL_RESTR;
    battery_capacity_hours_flying = 0.3;
    t_swap = 0.03333;
    M = 8; ! Big-M for MTZ constraints;
    R = 10;
    startdepot = 1;
    enddepot = 7;

! distance matrix;
dist =
0      8.8388 19.7642 17.6777 19.7642 26.5165 0.0000 12.3693 26.0000 29.2062 15.0000 22.3607
18.7883 19.1049
8.8388 0.0000 12.5000 8.8388 12.5000 17.6777 8.8388 6.6049 18.1418 20.4603 6.3738 14.2522
10.9495 10.2770
19.7642 12.5000 0.0000 8.8388 17.6777 12.5000 19.7642 7.4917 6.4517 16.7668 11.3192 16.2980
2.4749 9.6500
17.6777 8.8388 8.8388 0.0000 8.8388 8.8388 17.6777 9.5131 11.7686 11.8533 3.5355 7.9057
6.3639 1.5811
19.7642 12.5000 17.6777 8.8388 0.0000 12.5000 19.7642 16.7668 19.7895 12.4950 7.2887 3.9528
15.2000 8.2500
26.5165 17.6777 12.5000 8.8388 12.5000 0.0000 26.5165 17.1355 10.2042 4.3157 11.8585 8.8388
10.8900 7.4583
0.0000 8.8388 19.7642 17.6777 19.7642 26.5165 0.0000 12.3693 26.0000 29.2062 15.0000 22.3607
18.7883 19.1049
12.3693 6.6049 7.4917 9.5131 16.7668 17.1355 12.3693 0.0000 13.8924 20.8806 9.4868 17.1172
7.0711 11.0200
26.0000 18.1418 6.4517 11.7686 19.7895 10.2042 26.0000 13.8924 0.0000 14.3178 15.1327 17.2047
7.2801 11.7000
29.2062 20.4603 16.7668 11.8533 12.4950 4.3157 29.2062 20.8806 14.3178 0.0000 14.2127 8.5440
15.0333 10.2956
15.0000 6.3738 11.3192 3.5355 7.2887 11.8585 15.0000 9.4868 15.1327 14.2127 0.0000 8.0623
8.9443 4.4721
22.3607 14.2522 16.2980 7.9057 3.9528 8.8388 22.3607 17.1172 17.2047 8.5440 8.0623 0.0000
13.8900 6.7082
18.7883 10.9495 2.4749 6.3639 15.2000 10.8900 18.7883 7.0711 7.2801 15.0333 8.9443 13.8900
0.0000 7.2111
```

```

19.1049 10.2770 9.6500 1.5811 8.2500 7.4583 19.1049 11.0200 11.7000 10.2956 4.4721 6.7082
7.2111 0.000;

!Loops to be filled out by python script;
LOOP =
    2 8 8 8
    2 8 8 9
    .
    .
    .
    6 14 14 14;
ENDDATA

! Calculation to handle both 1-client, 2-client and 3-client loops;
@FOR(LOOP(node, c1, c2, c3) |
    node #GE# 2 #AND# node #LT# 7 #AND# c1 #GE# 8 #AND# c2 #GE# 8 #AND# c3 #GE# 8:
    TN(node,c1,c2,c3) = loop_used(node,c1,c2,c3) * (
        ! Case 1: Regular 3-client loop;
        ! 3PARCEL_RESTRE;
        (c1 #NE# c2 #AND# c2 #NE# c3 #AND# c1 #NE# c3) *
        (((dist(node,c1) + dist(c1,c2) + dist(c2,c3) + dist(c3,node)) / SPEED_DRONE) +
t_swap)
        !Case 2: 2-client loop (c2=c3, so only c1 and c2 are visited);
        ! 2PARCEL_RESTRE;
        + (c1 #NE# c2 #AND# c2 #EQ# c3) *
        (((dist(node,c1) + dist(c1,c2) + dist(c2,node)) / SPEED_DRONE) + t_swap)
        ! Case 3 : Single client loop (all clients are the same);
        + (c1 #EQ# c2 #AND# c2 #EQ# c3) *
        (((dist(node,c1) + dist(c1,node)) / SPEED_DRONE) + t_swap)
    );
    loop_distance(node,c1,c2,c3) =
        ! Case 1: Regular 3-client loop;
        !3PARCEL_RESTRE;
        (c1 #NE# c2 #AND# c2 #NE# c3 #AND# c1 #NE# c3) *
        (dist(node,c1) + dist(c1,c2) + dist(c2,c3) + dist(c3,node))
        ! Case 2: 2-client loop (c2=c3, so only c1 and c2 are visited);
        ! 2PARCEL_RESTRE;
        + (c1 #NE# c2 #AND# c2 #EQ# c3) *
        (dist(node,c1) + dist(c1,c2) + dist(c2,node))
        ! Case 3 : Single client loop (all clients are the same);
        + (c1 #EQ# c2 #AND# c2 #EQ# c3) *
        (dist(node,c1) + dist(c1,node))
    );
);

! Total truck time (based on selected arcs);
@FOR(A(node1,node2) | node1 #GE# 1 #AND# node1 #LT# 8 #AND# node2 #GE# 1 #AND# node2 #LT# 8:
TT(node1,node2)= ((x(node1,node2)*dist(node1,node2))/SPEED_TRUCK));

TTT = @SUM(A(node1,node2): TT(node1,node2));

! Time window;
TTT + TDT <= R;

! Total drone time using only selected loops;
TDT = @SUM(LOOP(node,c1,c2,c3): TN(node,c1,c2,c3));

! Objective: Minimize total time;
MIN = TTT + TDT;

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! restricties voor battery;
@FOR(LOOP(node, c1, c2, c3) |

```

```

node #GE# 2 #AND# node #LT# 7 #AND# c1 #GE# 8 #AND# c2 #GE# 8 #AND# c3 #GE# 8:
loop_used(node,c1,c2,c3) * loop_distance(node,c1,c2,c3) <= battery_capacity_hours_flying *
SPEED_DRONE
);

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! restricties voor z;

! Case 1: true 3-customer loops (all distinct);
! 3PARCEL_REST;
@FOR(LOOP(node,c1,c2,c3) |
    c1 #NE# c2 #AND# c2 #NE# c3 #AND# c1 #NE# c3:
    loop_used(node,c1,c2,c3) <= z(node,c1);
    loop_used(node,c1,c2,c3) <= y(c1,c2);
    loop_used(node,c1,c2,c3) <= y(c2,c3);
    loop_used(node,c1,c2,c3) <= z(c3,node);
    loop_used(node,c1,c2,c3) >= z(node,c1) + y(c1,c2) + y(c2,c3) + z(c3,node) - 3;
);

! Case 2: exactly 2 customers (c2=c3);
! 2PARCEL_REST;
@FOR(LOOP(node,c1,c2,c3) |
    c1 #NE# c2 #AND# c2 #EQ# c3:
    loop_used(node,c1,c2,c3) <= z(node,c1);
    loop_used(node,c1,c2,c3) <= y(c1,c2);
    loop_used(node,c1,c2,c3) <= z(c2,node);
    loop_used(node,c1,c2,c3) >= z(node,c1) + y(c1,c2) + z(c2,node) - 2;
);

! Case 3: single-customer loops (c1=c2=c3);
@FOR(LOOP(node,c1,c2,c3) |
    c1 #EQ# c2 #AND# c2 #EQ# c3:
    loop_used(node,c1,c2,c3) <= z(node,c1);
    loop_used(node,c1,c2,c3) <= z(c1,node);
    loop_used(node,c1,c2,c3) >= z(node,c1) + z(c1,node) - 1;
);

! not allowed to have z from customer to customer;
@FOR(A(cust1,cust2) | cust1 #GE# 8 #AND# cust2 #GE# 8: z(cust1,cust2) < 0.001);

! not allowed to have z from truck node to a truck node;
@FOR(A(n1,n2) | n1 #LE# 7 #AND# n2 #LE# 7: z(n1,n2) < 0.001);

! For any node that uses drones, ensure equal number of departures and arrivals of z;
@FOR(P(i) | i #LE# 7: @SUM(P(j) | j #GE# 8: z(i,j)) = @SUM(P(j2) | j2 #GE# 8: z(j2,i)));

! depart once from a client with a drone;
@FOR(P(client) | client #GE# 8:
@SUM(P(i): z(client, i) + y(client, i)) = 1);

! arrive once at a client with a drone;
@FOR(P(client) | client #GE# 8:
@SUM(P(i): z(i,client) + y(i, client)) = 1);

! not allowed to fly to enddepot or startdepot;
@FOR(P(node) | node #GE# 1:
    z(node,enddepot) < 0.001);
@FOR(P(node) | node #GE# 1:
    z(node,startdepot) < 0.001);

! not allowed to start flying from enddepot or startdepot;
@FOR(P(node) | node #GE# 1:

```

```

        z(enddepot,node) < 0.001);
@FOR(P(node) | node #GE# 1:
    z(startdepot,node) < 0.001);

! not allowed to fly to same place;
@FOR(P(i) | i #GE# 1:
    z(i,i) < 0.001);

! Do not allow to go from a node to a customer and to a different node;
@FOR(P(node1) | node1 #LE# 7:
    @FOR(P(node2) | node2 #LE# 7 #AND# node2 #NE# node1:
        @FOR(P(cust) | cust #GE# 8:
            z(node1,cust) + z(cust,node2) <= 1
        )
    )
);

! Do not allow to go from a node to a customer, to a different customer and to a different node;
! 2PARCEL_RESTRT;
@FOR(P(node1) | node1 #LE# 7:
    @FOR(P(node2) | node2 #LE# 7 #AND# node2 #NE# node1:
        @FOR(P(cust1) | cust1 #GE# 8:
            @FOR(P(cust2) | cust2 #GE# 8 #AND# cust1 #NE# cust2:
                z(node1,cust1) + y(cust1, cust2) + z(cust2,node2) <= 2
            )
        )
    )
);

! Do not allow to go from a node to a customer, to a different customer to a different customer
to a different node;
! 3PARCEL_RESTRT;
@FOR(P(node1) | node1 #LE# 7:
    @FOR(P(node2) | node2 #LE# 7 #AND# node2 #NE# node1:
        @FOR(P(cust1) | cust1 #GE# 8:
            @FOR(P(cust2) | cust2 #GE# 8 #AND# cust1 #NE# cust2:
                @FOR(P(cust3) | cust3 #GE# 8 #AND# cust1 #NE# cust3 #AND# cust3 #NE# cust2:
                    z(node1,cust1) + y(cust1, cust2) + y(cust2,cust3) + z(cust3,node2) <= 3
                )
            )
        )
    )
);

! Do not allow to go from a node to a customer, to a different customer and to a different node,
to be modified when max_parcel is two;
! 3PARCEL_RESTRT;
@FOR(P(cust1) | cust1 #GE# 8:
    @FOR(P(cust2) | cust2 #GE# 8 #AND# cust2 #NE# cust1:
        @FOR(P(cust3) | cust3 #GE# 8 #AND# cust3 #NE# cust1 #AND# cust3 #NE# cust2:
            @FOR(P(cust4) | cust4 #GE# 8 #AND# cust4 #NE# cust3 #AND# cust4 #NE# cust2 #AND# cust4
#NE# cust1:
                y(cust1,cust2) + y(cust2, cust3) + y(cust3,cust4) <= (max_parcel - 1)
            )
        )
    )
);

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! restricties voor y ;

! Never go from a node to the same node;

```

```

@FOR(A(i,j) | i #EQ# j: y(i,j) < 0.001);

! For customers: exactly one incoming and outgoing trip;
@FOR(P(i) | i #GE# 8:
    @SUM(P(j) | i #NE# j: y(i,j)+z(i,j)) = 1;
    @SUM(P(j) | i #NE# j: y(j,i)+z(j,i)) = 1;
);

! Only trips between customers for y;
@FOR(P(i) | i #LT# 8:
    @SUM(P(j) | j #GE# 1: y(i,j)) < 0.001;
    @SUM(P(j) | j #GE# 1: y(j,i)) < 0.001;
);

! No trips between customers back and forth;
@FOR(P(i) | i #GE# 8:
    @FOR(P(j) | j #GE# 8 #AND# i #NE# j:
        y(i,j) + y(j,i) <= 1
    );
);

! Never do a tour between 3 clients;
@FOR(P(cust1) | cust1 #GE# 8:
    @FOR(P(cust2) | cust2 #GE# 8 #AND# cust2 #NE# cust1:
        @FOR(P(cust3) | cust3 #GE# 8 #AND# cust3 #NE# cust1 #AND# cust3 #NE# cust2:
            y(cust1, cust2) + y(cust2, cust3) + y(cust3, cust1) <= (max_parcel-1)
        )
    )
);

! Never do a tour between 2 clients back and forth;
@FOR(P(cust1) | cust1 #GE# 8:
    @FOR(P(cust2) | cust2 #GE# 8 #AND# cust2 #NE# cust1:
        y(cust1, cust2) + y(cust2, cust1) <= 1;
    )
);

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! restricties voor y en z ;

! Uit elke klant vertrekt exact één keer een drone (via y of z);
@FOR(P(klant) | klant #GE# 8:
    @SUM(A(klant,j) | j #LE# 7: z(klant,j))
    +
    @SUM(A(klant,j) | j #GE# 8: y(klant,j))
    = 1);

! Bij elke klant arriveert exact één keer een drone (via y of z);
@FOR(P(klant) | klant #GE# 8:
    @SUM(A(j,klant) | j #LE# 7: z(j,klant))
    +
    @SUM(A(j,klant) | j #GE# 8: y(j,klant))
    = 1);

! Ensure that drones always start from and return to a node using z variables (complete loops);
total_y_loops = @SUM(A(cust1,cust2) | cust1 #GE# 8 #AND# cust2 #GE# 8 #AND# cust1 #NE# cust2:
y(cust1,cust2));
total_z_loops = @SUM(A(node1,cust1) | node1 #LE# 7 #AND# cust1 #GE# 8: z(node1,cust1)) +
@SUM(A(cust2,node2) | cust2 #GE# 8 #AND# node2 #LE# 7: z(cust2,node2));

! For every group of 3 y-loops, there must be at least one complete loop with 2 z variables;
total_z_loops >= 2 * (total_y_loops / 3);

```

```

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! restricties voor x ;

! Max one truck departure from each node;
@FOR(P(node1) | node1 #GE# 1 #AND# node1 #LE# 7:
    @SUM(P(node2) | node2 #LE# 7: x(node1, node2)) <= 1
);

! Max one truck arrival at each node;
@FOR(P(node1) | node1 #GE# 1 #AND# node1 #LE# 7:
    @SUM(P(node2) | node2 #LE# 7: x(node2, node1)) <= 1
);

! not allowed to have a truck drive (x) from/to a customer;
@FOR(A(cust,node) | cust #GE# 8 #AND# node #GE# 1: x(cust,node) < 0.001);
@FOR(A(node,cust) | cust #GE# 8 #AND# node #GE# 1: x(node,cust) < 0.001);

! Exactly one trip into the end-depot (node 7) ;
@SUM(A(node,i) | node #LT# 7 #AND# i #EQ# 7:
x(node,i)) = 1;

! Exactly zero trip from the end-depot (node 7) ;
@SUM(A(node,i) | node #LT# 7 #AND# i #EQ# 7:
x(i,node)) = 0;

! Exactly one trip from the start-depot (node 1) ;
@SUM(A(start,node) | node #LT# 7 #AND# start #EQ# 1:
x(start,node)) = 1;

! Exactly zero trip into the start-depot (node 1) ;
@SUM(A(start,node) | node #LT# 7 #AND# start #EQ# 1:
x(node,start)) = 0;

! No trip from 1 to 7;
@SUM(A(start,node) | node #EQ# 7 #AND# start #EQ# 1:
x(start,node)) = 0;

! Max one ingoing trip for each node;
@FOR(P(node1) | node1 #LE# 7:
    @FOR(P(node2) | node2 #LE# 7 #AND# node2 #NE# node1:
        x(node1,node2) <= 1;
    );
);

! Never go from a node to the same node;
@FOR(A(i,j) | i #EQ# j: x(i,j) = 0);

! Each node (2-6) one outgoing and one incoming trip when there is a z = 1 for them (not for depots);
! Hulpsum voor knoop k;
@FOR(P(node) | node #GE# 2 #AND# node #LE# 6:
    zsum(node) = @SUM(A(node2,node) | node2 #GE# 1: z(node2,node))
);

@FOR(P(node) | node #GE# 2 #AND# node #LE# 6:
    @SUM(A(node,node2) | node2 #GE# 1: x(node,node2)) <= zsum(node);
    @SUM(A(node2,node) | node2 #GE# 1: x(node2,node)) <= zsum(node);

    @SUM(A(node,node2) | node2 #GE# 1: x(node,node2)) >= zsum(node) / M;
    @SUM(A(node2,node) | node2 #GE# 1: x(node2,node)) >= zsum(node) / M;
);

```

```

!Truck can not go to customers;
@FOR(P(i) | i #LT# 8:
    @SUM(P(j) | i #NE# j #AND# j #GE# 8: x(i,j)) = 0
);

! Subtour elimination for trucks (x) in 4 parts:

! part 1;
! Do not allow to go from node A to node B and to node A;
@FOR(P(node1) | node1 #LE# 7:
    @FOR(P(node2) | node2 #LE# 7 #AND# node2 #NE# node1:
        x(node1,node2) + x(node2,node1) <= 1
    )
);

! part 2;
! Do not allow to go from node A to node B, to node C and to node A;
@FOR(P(node1) | node1 #LE# 7:
    @FOR(P(node2) | node2 #LE# 7 #AND# node2 #NE# node1:
        @FOR(P(node3) | node3 #LE# 7 #AND# node3 #NE# node2 #AND# node3 #NE# node1:
@FOR(P(node4) | node4 #LE# 7 #AND# node4 #NE# node3 #AND# node4 #NE# node2 #AND# node4 #NE#
node1:
            x(node1,node2) + x(node2, node3) + x(node3, node1) <= 2
        )
    )
);

! part 3;
! Do not allow to go from node A to node B, to node C to node D and back to node A;
@FOR(P(node1) | node1 #LE# 7:
    @FOR(P(node2) | node2 #LE# 7 #AND# node2 #NE# node1:
        @FOR(P(node3) | node3 #LE# 7 #AND# node3 #NE# node2 #AND# node3 #NE# node1:
            @FOR(P(node4) | node4 #LE# 7 #AND# node4 #NE# node3 #AND# node4 #NE# node2 #AND# node4
#NE# node1:
                x(node1,node2) + x(node2, node3) + x(node3, node4) + x(node4, node1) <= 3
            )
        )
);

! part 4;
! Do not allow to go from node A to B to C to D to E and then back to A;
@FOR(P(node1) | node1 #LE# 7:
    @FOR(P(node2) | node2 #LE# 7 #AND# node2 #NE# node1:
        @FOR(P(node3) | node3 #LE# 7 #AND# node3 #NE# node2 #AND# node3 #NE# node1:
            @FOR(P(node4) | node4 #LE# 7 #AND# node4 #NE# node3 #AND# node4 #NE# node2 #AND# node4
#NE# node1:
                @FOR(P(node5) | node5 #LE# 7 #AND# node5 #NE# node4 #AND# node5 #NE# node3 #AND#
node5 #NE# node2 #AND# node5 #NE# node1:
                    x(node1,node2) + x(node2, node3) + x(node3, node4) + x(node4,node5) + x(node5, node1)
<= 4;
                )
            )
        )
);

!Keeping track of amount of truckstops;

```

```
Stops= @SUM(A(node1,node2) | node1 #LT# 8 #AND# node2 #LT# 8 #AND# node1 #NE# node2:  
x(node1,node2))-1;
```

```
! Binary variables;  
@FOR(A(i,j): @BIN(x(i,j)));  
@FOR(A(i,j): @BIN(y(i,j)));  
@FOR(A(i,j): @BIN(z(i,j)));  
@FOR(LOOP(node,c1,c2,c3): @BIN(loop_used(node,c1,c2,c3)));
```

```
END
```