



**UHASSELT**

KNOWLEDGE IN ACTION

## Faculteit Bedrijfseconomische Wetenschappen

master handelsingenieur

### ***Masterthesis***

***Urban consolidation centers als tijdelijke opslaglocatie: voordeel van de integratie van  
voorraad- en rittenplanningsbeslissingen***

### **Sander Smeets**

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

### **PROMOTOR :**

Prof. dr. Kris BRAEKERS



**UHASSELT**

KNOWLEDGE IN ACTION

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

**2023**  
**2024**



# Faculteit Bedrijfseconomische Wetenschappen

master handelsingenieur

## ***Masterthesis***

***Urban consolidation centers als tijdelijke opslaglocatie: voordeel van de integratie van voorraad- en rittenplanningsbeslissingen***

### **Sander Smeets**

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

### **PROMOTOR :**

Prof. dr. Kris BRAEKERS



# Woord Vooraf

Deze masterproef over Stedelijke Consolidatiecentra (SCC's) als tijdelijke opslaglocatie vormt het sluitstuk van mijn opleiding tot Handelsingenieur in de afstudeerrichting Operationeel Management en Logistiek aan de Universiteit Hasselt.

Het gekozen onderwerp was mijn eerste keuze en trok onmiddellijk mijn aandacht vanwege het vernieuwende aspect van voorraadbeslissingen in rittenplanningsmodellen en de directe praktijklink met SCC's. De literatuurstudie biedt eerst een overzicht van de bestaande literatuur over deze onderwerpen, waarna het praktijkgedeelte een ontwikkeld model toepast op een fictieve dataset. Het doel hiervan is om via het model inzicht te verkrijgen in de kosten- en efficiëntievoordelen van het aanhouden van voorraad in SCC's en te bepalen wanneer dit het meest zinvol is.

Het opstellen van deze masterproef was bij wijlen uitdagend, maar ook een leerzaam proces waarin ik veel heb geleerd. Verschillende vaardigheden, zoals het werken met programma's als Excel en LINGO, zijn aanzienlijk aangescherpt. Deze ervaring heeft mijn kennis en praktische vaardigheden verder ontwikkeld, wat een waardevolle toevoeging is aan mijn opleiding.

Bij deze wil ik mijn dank uitspreken aan allen die mij hebben geholpen en gesteund bij het tot stand komen van deze masterproef. Allereerst gaat mijn dank uit naar Prof. Dr. Kris Braekers voor alle constructieve adviezen en begeleiding tijdens de contactmomenten en daarbuiten, die zorgden voor de juiste richting en ondersteuning. Daarnaast wil ik Dr. Titi Iswari bedanken voor het beschikbaar stellen van de data, zonder welke het praktijkgedeelte van deze masterproef niet mogelijk was geweest. Tot slot wil ik het onderwijsteam van professoren en assistenten van de Universiteit Hasselt bedanken voor de kennis die zij mij hebben aangereikt, waardoor ik deze masterproef kon voltooien.

Sander Smeets

Maasmechelen, juni 2024



# Samenvatting

## Inleiding

Door de wereldwijde verstedelijking, die resulteert in een combinatie van grote economische activiteit en hoge bevolkingsdichtheid in stedelijke gebieden, zijn aanzienlijke logistieke en milieu uitdagingen ontstaan, waaronder verkeerscongestie. Dit vereist efficiënte en kosteneffectieve oplossingen, zoals strategisch geplaatste Stedelijke Consolidatiecentra (SCC's) aan de rand van stedelijke centra voor voorraad- en distributiefuncties. SCC's consolideren leveringen van buiten de stedelijke gebieden, waarna ze deze naar klanten in de stedelijke centra distribueren. Deze masterproef onderzoekt de rol van SCC's als tijdelijke opslaglocaties in stadslogistiek.

Hoewel SCC's vaak niet financieel levensvatbaar blijken, kunnen betere coördinatie en integratie van besluitvormingsprocessen hun effectiviteit vergroten. SCC's creëren een twee-echelon netwerk waarbij het eerste echelon leveringen van leveranciers aan de SCC's behandelt en het tweede echelon de distributie tussen SCC's en retailers bevat. Het concept van stadslogistiek beschouwt transportbelanghebbenden, materiaalstromen en activiteiten als componenten van een geïntegreerd logistiek systeem, geoptimaliseerd via voorraad- en transportbeheer. Essentiële elementen voor de efficiëntie, kostenbeheersing en duurzaamheid van deze stedelijke toeleveringsketens zijn voertuigrouteringsproblemen en voorraadsystemen.

De centrale onderzoeksvraag van deze masterproef luidt: *"Hoe draagt het rekening houden met voorraad in combinatie met rittenplanning bij aan het reduceren van kosten in een stedelijk distributiesysteem met twee echelons?"*. Dit wordt onderzocht via een grondige literatuurstudie en praktijkonderzoek met verschillende scenario's.

## Literatuurstudie

Het eerste onderdeel van de literatuurstudie bespreekt SCC's op het gebied van financiën, succescriteria, de huidige stand van zaken en de algemene voor- en nadelen. SCC's verbeteren, als tijdelijke opslaglocaties voor consolidatie, de efficiëntie en duurzaamheid van stedelijke distributiesystemen door de noodzaak voor slecht beladen vrachtvoertuigen te vermijden. Daarom zijn SCC's een van de meest geïmplementeerde en onderzochte initiatieven binnen de stadslogistiek. Dit leidt tot voordelen zoals efficiënter transport, betere logistieke planning en optimaler gebruik van middelen. Bovendien kunnen SCC's diensten met toegevoegde waarde leveren, zoals opslag en voorraadbeheer. Door opslagruimte naar SCC's te verplaatsen, kunnen retailers namelijk besparen op hoge huurkosten.

Ondanks hun potentieel hebben veel SCC-projecten te maken met hoge opstart- en operationele kosten en een gebrek aan toegevoegde waarde voor transporteurs en ontvangers. Succesvolle SCC's moeten voldoen aan criteria zoals beschikbaarheid van financiering, sterke publieke betrokkenheid, bestaande problemen binnen leveringsgebieden, bottom-up druk van potentiële gebruikers en het oplossen van logistieke problemen bij locaties met één eigenaar, zoals luchthavens en winkelcentra.

Het tweede onderdeel van de literatuurstudie behandelt twee-echelon distributienetwerken, gericht op het optimaliseren van de goederenstroom binnen de stadslogistiek door efficiënte routes, vervoersmodi en voorraadniveaus te bepalen. Twee-echelon voertuigrouteringsproblemen (2E-VRP)

en voorraadmodellen coördineren voorraad- en routeringsbeslissingen, wat kan leiden tot aanzienlijke kostenbesparingen en verbeterde efficiëntie.

De sectie over het 2E-VRP bespreekt het doel en de werking van dit model, evenals de literatuur en veelvoorkomende extensies. Het doel is het vinden van primaire en secundaire routes die aan de vraag van retailers voldoen, terwijl de transport- en goederenbehandelingskosten worden geminimaliseerd. Exacte oplossingsmethoden zoals branch-and-cut en benaderende heuristieken worden hiervoor gebruikt. Recente onderzoeken richten zich op varianten van 2E-VRP's die inspelen op stedelijke ontwikkelingen.

Twee-echelon voorraadsystemen beheren gelijktijdig de voorraden bij SCC's en retailers om de leveringen te optimaliseren. Ze streven voor de voorraadniveaus naar een balans tussen reactievermogen en kosten, met als doel de totale kosten te minimaliseren en aan de vraag te voldoen. Dit onderzoeksgebied is actief vanwege de complexiteit en praktische relevantie. De sectie hierover bespreekt tevens de assumpties en werking van deze modellen.

Aangezien het cruciaal is om beslissingen te integreren en coördineren bij SCC's, is het "inventory-routing problem" (IRP) een relevant model om dit te bereiken. De basis voor het IRP wordt gevormd door het vorige onderdeel over twee-echelon netwerken. Het IRP integreert namelijk voorraadbeheer, voertuigrouting en leveringsplanning, waarbij de leverancier tegelijkertijd drie beslissingen moet nemen: wanneer een klant te bedienen, hoeveel te leveren en hoe klanten te combineren in voertuigroutes. Het doel hiervan is om de totale voorraad- en distributiekosten te minimaliseren en aan de vraag te voldoen. Vanwege de complexiteit van dit model zijn exacte oplossingen vaak onhaalbaar, waardoor heuristieken en metaheuristieken worden toegepast.

Recente ontwikkelingen rond IRP's hebben geleid tot talrijke extensies van het basismodel. Deze masterproef richt zich op een geavanceerde versie van het IRP binnen een twee-echelon systeem, waarbij het SCC de controle heeft over voorraad- en routeringsbeslissingen. Het doel van het twee-echelon IRP (2E-IRP) is om een geïntegreerde voorraad- en routeringsstrategie te bepalen die de totale kosten minimaliseert en aan de eisen van de klant voldoet. Vanwege de hoge complexiteit staat het onderzoek naar het 2E-IRP nog in de kinderschoenen, met slechts enkele studies die stedelijke kenmerken in overweging nemen. Voor het 2E-IRP wordt door de bestaande literatuur een tweefasig matheuristisch algoritme voorgesteld, dat een metaheuristiek combineert met een exact branch-and-cut algoritme.

## Praktijkgedeelte

Het praktijkgedeelte van deze masterproef onderzoekt hoe de financiële levensvatbaarheid van SCC's kan worden verbeterd. Hiervoor is een optimalisatiemodel ontwikkeld en getest om leveringen aan een SCC binnen een stedelijk twee-echelon distributiesysteem kostenefficiënter te maken inzake leveringshoeveelheden en -tijden. Dit model voor het eerste echelon is gebaseerd op een reeds geoptimaliseerd tweede echelon middels een bestaand IRP-model. Bijgehouden statistieken omvatten leverings- en voorraadkosten, de gemiddelde beladingsgraad van bestelwagens en de gemiddelde bezettingsgraad van het SCC.

Scenario's met variërende opslagcapaciteit en aantal retailers (tien en dertig retailers, gecombineerd met zes leveranciers/producten) werden gedurende veertien periodes getest. Het optimalisatiemodel toonde consistente voordelen in kosten en efficiëntie ten opzichte van de oorspronkelijke situatie. Integratie en coördinatie via informatie-uitwisseling tussen de echelons betreffende leveringshoeveelheden en -tijden bleek een effectieve strategie. De configuratie met dertig retailers presteerde beter, maar de gemiddelde bezettingsgraad bleek in beide configuraties onvoldoende om de vooropgestelde opslagcapaciteit te benaderen. Bij het bepalen van de opslagcapaciteit van het SCC moet daarom een balans worden gevonden tussen een verbeterde bezettingsgraad van het SCC en verlaagde totale distributiekosten. Gezien de precaire financiële levensvatbaarheid van SCC's wordt het scenario met lagere opslagcapaciteit en verbeterde bezettingsgraad in dit geval verkozen. Integratie en coördinatie van informatie tussen leveranciers, SCC en retailers speelt bij deze afweging eveneens een cruciale rol.

## Waarde van het onderzoek

Dit onderzoek draagt bij aan de bestaande kennis door de effectiviteit van SCC's in stedelijke distributiesystemen te evalueren en de voordelen van een geïntegreerde benadering van voorraadbeheer en rittenplanning te onderstrepen. De bevindingen bevestigen dat SCC's een belangrijke rol kunnen spelen bij het verbeteren van stedelijke distributie door functies zoals opslag, transportdiensten en voorraadbeheer aan te bieden. Door voorraad- en routeringsbeslissingen te integreren, kunnen SCC's niet alleen bijdragen aan kostenreductie, maar ook aan de algehele efficiëntie en duurzaamheid. De resultaten suggereren dat de fragiele financiële levensvatbaarheid van SCC's kan worden verbeterd door een nauwkeurige afstemming van de opslagcapaciteit en effectieve coördinatie tussen leveranciers, SCC's en retailers. Dit onderzoek biedt daarom waardevolle inzichten voor beleidsmakers en logistieke planners bij het ontwikkelen van strategieën voor duurzame en efficiënte stedelijke logistiek.

## Kritische beschouwingen

Deze masterproef kent enkele beperkingen die de generaliseerbaarheid van de resultaten beïnvloeden. Er zijn slechts twee configuraties onderzocht met lage voorraadkosten bij de retailers en een vast aantal van zes leveranciers, wat het verschil tussen voorraadkosten bij het SCC en de retailers beperkte. Daarnaast is er geen volledig geïntegreerd twee-echelon IRP ontwikkeld, wat de complexiteit beperkte maar de praktische toepasbaarheid kan verminderen. Toekomstig onderzoek zou zich moeten richten op de integratie van informatie tussen leveranciers, SCC's en retailers om effectievere modellen te ontwikkelen. Het is aanbevolen om variaties in voorraadkosten en aantallen leveranciers en retailers uitgebreider te onderzoeken. Het testen van diverse typen voertuigen in het eerste echelon kan tevens bijdragen aan een flexibeler logistiek systeem. Tot slot is het essentieel om een breder scala aan opslagcapaciteiten bij SCC's te testen om optimale configuraties te bepalen en een dieper inzicht te krijgen in hun impact op logistieke prestaties en kosten. Door deze beperkingen aan te pakken, kunnen toekomstige onderzoeken bijdragen aan een dieper inzicht in de dynamiek van stadslogistiek en de ontwikkeling van kostenefficiëntere distributiesystemen.



# Inhoud

|                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------|-----|
| Woord Vooraf.....                                                 | i   |
| Samenvatting .....                                                | iii |
| 1 Inleiding.....                                                  | 1   |
| 1.1 Praktijkrelevantie.....                                       | 1   |
| 1.1.1 De noodzaak van Stedelijke Consolidatiecentra (SCC's) ..... | 1   |
| 1.1.2 Coördinatie en integratie .....                             | 4   |
| 1.1.3 Bestaande modellen .....                                    | 4   |
| 1.2 Onderzoeksvraag .....                                         | 7   |
| 1.3 Methodologie .....                                            | 8   |
| 1.3.1 Literatuurstudie .....                                      | 8   |
| 1.3.2 Praktijkgedeelte .....                                      | 9   |
| 2 Stedelijke Consolidatiecentra (SCC's) .....                     | 10  |
| 2.1 Basisprincipes van SCC's: Definitie, Doel en Categorieën..... | 10  |
| 2.2 Financiën.....                                                | 12  |
| 2.2.1 Kanttekening .....                                          | 12  |
| 2.2.2 Inkomsten .....                                             | 13  |
| 2.2.3 Kosten .....                                                | 14  |
| 2.2.4 Financiële levensvatbaarheid .....                          | 15  |
| 2.2.5 Criteria voor succes .....                                  | 18  |
| 2.3 Diensten met toegevoegde waarde.....                          | 19  |
| 2.4 Stand van zaken literatuur.....                               | 21  |
| 2.5 Onderzoekslacunes .....                                       | 22  |
| 2.6 Voor- en nadelen.....                                         | 24  |
| 3 Twee-echelon netwerken .....                                    | 26  |
| 3.1 Twee-echelon voertuigrouteringsproblemen (2E-VRP) .....       | 26  |
| 3.1.1 Doel & assumpties.....                                      | 26  |
| 3.1.2 Werking: 2E-CVRP.....                                       | 27  |
| 3.1.3 Stand van literatuur & extensies .....                      | 29  |
| 3.2 Twee-echelon voorraadsystemen .....                           | 31  |
| 3.2.1 Doel & assumpties.....                                      | 31  |
| 3.2.2 Werking.....                                                | 32  |
| 4 IRP .....                                                       | 36  |
| 4.1 VMI & definitie .....                                         | 36  |
| 4.2 Classificatie .....                                           | 37  |

|       |                                                    |    |
|-------|----------------------------------------------------|----|
| 4.2.1 | Structurele varianten .....                        | 37 |
| 4.2.2 | Beschikbaarheid van informatie over de vraag.....  | 38 |
| 4.3   | Doel & assumpties.....                             | 39 |
| 4.4   | Werking.....                                       | 39 |
| 4.5   | Extensies: 2E-IRP.....                             | 41 |
| 4.5.1 | Doel & assumpties.....                             | 42 |
| 4.5.2 | Werking.....                                       | 43 |
| 4.5.3 | Stand van literatuur.....                          | 44 |
| 5     | Praktijkonderzoek.....                             | 45 |
| 5.1   | Introductie simulatiemodel.....                    | 45 |
| 5.1.1 | Doel.....                                          | 45 |
| 5.1.2 | Context.....                                       | 46 |
| 5.1.3 | Data .....                                         | 46 |
| 5.1.4 | Wiskundig model.....                               | 47 |
| 5.2   | Opzet experimenten .....                           | 49 |
| 5.3   | Resultatenbespreking.....                          | 51 |
| 5.3.1 | Configuratie met tien retailers.....               | 51 |
| 5.3.2 | Configuratie met dertig retailers .....            | 54 |
| 5.3.3 | Vergelijking tussen configuraties.....             | 57 |
| 5.3.4 | Scenario met SCC-capaciteit van 3000 eenheden..... | 60 |
| 5.4   | Conclusie praktijkonderzoek.....                   | 66 |
| 6     | Conclusie.....                                     | 68 |
| 7     | Beperkingen en toekomstig onderzoek.....           | 71 |
| 7.1   | Beperkingen.....                                   | 71 |
| 7.2   | Toekomstig onderzoek.....                          | 71 |
| 8     | Bibliografie.....                                  | 73 |
| 9     | Bijlagen.....                                      | 81 |
| 9.1   | Resultaten optimalisatie 10 retailers .....        | 81 |
| 9.2   | Resultaten optimalisatie 30 retailers .....        | 82 |
| 9.3   | Resultaten optimalisatie 10 retailers LC.....      | 83 |
| 9.4   | Resultaten optimalisatie 30 retailers LC.....      | 84 |

# 1 Inleiding

In dit eerste inleidende hoofdstuk van de masterproef wordt de praktijkrelevantie van het onderwerp belicht, waarbij de economische en maatschappelijke relevantie worden besproken. Vervolgens wordt de centrale onderzoeksvraag geïntroduceerd, samen met enkele deelvragen, om de lezer inzicht te geven in het specifieke onderzoeksdoel van deze masterproef. Ten slotte wordt de methodologie toegelicht, waarbij de aanpak en tools worden besproken die zullen worden gebruikt om de centrale onderzoeksvraag te beantwoorden. Hierbij wordt vermeld hoe een literatuurstudie en een praktijkgedeelte zullen worden uitgevoerd om inzichten te verkrijgen in de rol van stedelijke consolidatiecentra als tijdelijke opslaglocaties.

## 1.1 Praktijkrelevantie

### 1.1.1 De noodzaak van Stedelijke Consolidatiecentra (SCC's)

De wereldwijde verstedelijkingstrend is onmiskenbaar. Op dit moment woont volgens gegevens van de Wereldbank 56 procent van de wereldbevolking, oftewel 4,4 miljard mensen, in stedelijke gebieden (World Bank, z.d.). Deze trend lijkt zich in de nabije toekomst enkel voort te zetten, waarbij tegen 2050 naar verwachting bijna 70 procent van de wereldbevolking in steden zal leven (World Bank, z.d.). Europa vormt hierop geen uitzondering, met ongeveer 38,9 procent van de bevolking die in 2021 in steden woont en 35,9 procent die woont in voorsteden en kleinere stedelijke gebieden (Eurostat, z.d.). Het economisch belang van steden is bijgevolg immens, aangezien er 80 procent van het wereldwijde bruto binnenlands product (bbp) wordt gegenereerd (World Bank, z.d.).

De combinatie van grote economische activiteit en hoge bevolkingsdichtheid brengt echter ook de nodige logistieke uitdagingen met zich mee. Deze uitdagingen beïnvloeden verschillende logistieke activiteiten in steden zoals transport, consolidatie en distributie van goederen. Die activiteiten kunnen worden samengevoegd onder de term "stadslogistiek" (Björklund & Johansson, 2018). Stadslogistiek wordt gedefinieerd als: "Het proces van het optimaliseren van zowel logistieke als transportactiviteiten van particuliere bedrijven in stedelijke gebieden, rekening houdend met de verkeersomgeving, verkeerscongestie en energieverbruik in het kader van een markteconomie." (Dolati Neghabadi et al., 2019).

Een gevolg van de snelle expansie van stedelijke gebieden is de voortdurende toename van de vraag naar goederen, waardoor uitdagingen zoals verkeerscongestie, geluidshinder en milieuvervuiling enkel vergroten (Björklund & Johansson, 2018; Crainic et al., 2020). In termen van gemiddelde jaarlijkse groei van de retailverkoop vertaalt deze stijgende goederenvraag zich naar een jaarlijkse toename van maar liefst 9,9 procent voor Shanghai, 7,7 procent voor Mumbai en 4 procent voor New York in de periode tussen 2012 en 2025 (*Average Retail Sales Growth per Year by City, 2012-2025*, z.d.). Voor Europese steden zoals Londen, Parijs en Berlijn bedraagt deze groei respectievelijk 4, 1.7 en 0.7 procent per jaar (*Average Retail Sales Growth per Year by City, 2012-2025*, z.d.). Dit resulteert in een groeiende behoefte aan goederenvervoersdiensten die aanzienlijke milieueffecten hebben, met name op het gebied van lokale luchtverontreiniging en geluidshinder, en daardoor een significante invloed hebben op de gezondheid van de meest kwetsbare inwoners van steden (McKinnon et al., 2015).

Op het gebied van verkeerscongestie draagt het goederenvervoer op de weg in mindere mate bij dan het personenvervoer. Auto's worden geschat 50 procent van de totale maatschappelijke kosten van congestie te veroorzaken, terwijl vrachtwagens slechts 27 procent van dit totaal voor hun rekening nemen. In Europa bedragen de kosten van inefficiënties in stedelijke mobiliteit, met name verkeerscongestie, naar schatting 110 miljard euro per jaar, wat meer dan 1 procent van het bruto binnenlands product (bbp) van de EU vertegenwoordigt (*Audit Preview*, 2020). In de VS leiden brandstofverspilling, productiviteitsverlies en verminderde mobiliteit als gevolg van stedelijke congestie tot een geschat verlies van 85 miljard dollar per jaar voor weggebruikers. Verder behoort de logistieke sector tot een van de zwaarst getroffen sectoren door overbelaste wegennetwerken. Congestie heeft negatieve gevolgen voor de economische efficiëntie en het concurrentievermogen op het gebied van transport door het verhogen van de kosten en het verminderen van de betrouwbaarheid van logistieke dienstregelingen. (McKinnon et al., 2015)

Al deze aspecten maken logistieke operaties steeds complexer, waardoor de effectiviteit van leveringsprocessen, het serviceniveau van de klant en de kwaliteit van leven voor burgers erop achteruitgaan (Kubek & Więcek, 2019). Op het vlak van emissies wordt er om de impact hiervan te verminderen steeds meer gebruik gemaakt van kleinere, milieuvriendelijkere, transportmiddelen zoals elektrische voertuigen of cargo bikes om goederen te leveren in stadscentra. Deze trend wordt verder versterkt door de opkomst van lage-emissiezones (LEZ's) in Europese steden, die zware en vervuilende voertuigen verbieden of extra belasten. Momenteel zijn er 320 LEZ's in Europese steden en worden er meer dan 500 verwacht tegen 2025, met tevens 35 zero-emissiezones (ZEZ) gepland. Zero-emissiezones staan geen voertuigen toe die worden aangedreven door verbrandingsmotoren. (Williamson et al., 2022)

Hierdoor is er een groeiende nood aan strategisch geplaatste locaties aan de rand van stedelijke centra die kunnen fungeren als voorraad- en distributieplaats waar tevens van voertuig gewisseld kan worden. Stedelijke consolidatiecentra (SCC's) hebben het potentieel om deze rol te vervullen en daarmee de milieu- en maatschappelijke uitdagingen van stedelijk goederenvervoer het hoofd te bieden. Daarnaast hebben ze het vermogen om de efficiëntie van distributiesystemen te verbeteren en mede de overgang naar milieuvriendelijkere voertuigen te bevorderen (Allen et al., 2012).

Een stedelijk consolidatiecentrum (SCC) is een logistieke faciliteit gelegen in een stedelijk gebied, van waaruit geconsolideerde leveringen binnen dat gebied worden uitgevoerd (Browne et al., 2005). Bovendien kunnen SCC's ook andere diensten aanbieden, zoals opslag en pre-retailactiviteiten (Björklund & Johansson, 2018). Deze pre-retailactiviteiten omvatten het uitpakken van zendingen, het gereedmaken van producten voor presentatie en het aanbrengen van prijssetiketten, waardoor de benodigde tijd en ruimte bij leveringen verminderen (Browne et al., 2005). Andere mogelijke diensten omvatten verbeterde omgekeerde logistiek, verminderde leverfrequenties dankzij een betere bezettingsgraad en verbeterd voorraadbeheer (Johansson & Björklund, 2017). Deze diensten dragen bij aan een verbeterde efficiëntie en punctualiteit van het stedelijk goederenvervoer. In het geval van verminderde leverfrequenties zorgt het tevens voor minder onderbrekingen voor het personeel, waardoor zij meer tijd overhouden voor hun kerntaken: het verkopen van producten in plaats van het beheren van in-store logistieke activiteiten (Browne et al., 2005; Johansson & Björklund, 2017). Het aanbieden van extra opslagcapaciteit in gebieden aan de rand van steden met

lagere huurkosten kan ook aanzienlijke economische voordelen bieden (Johansson & Björklund, 2017). Zo kunnen retailers op die manier kostbare opslagruimte in stedelijk gebied verkleinen en tegelijkertijd de ruimte beschikbaar voor verkoop vergroten, waarbij het SCC kleine en frequente leveringen biedt om hun voorraden aan te vullen (Iswari et al., 2023).

Met SCC's hoeft het langeafstandsvervoer met grote, vaak vervuilende, voertuigen die zijn ontworpen voor regionaal transport zich nooit in het stedelijk gebied te begeven. In plaats daarvan bieden ze een geconcentreerd punt waar goederen worden geconsolideerd voordat ze met kleinere, milieuvriendelijkere en stadsgerichte voertuigen worden afgeleverd in de stadscentra. Dit vermindert niet alleen verkeerscongestie en emissies, maar zorgt ook voor een verhoogde capaciteitsbezetting door beter gebruik van de voertuigcapaciteit in stadsdistributie. (Johansson & Björklund, 2017)

Samenvattend hebben Stedelijke Consolidatiecentra (SCC's), indien correct geïmplementeerd, het potentieel om aanzienlijke voordelen te bieden door zowel de prestaties van de toeleveringsketen te verbeteren als de milieu- en maatschappelijke gevolgen van goederentransport in stedelijke gebieden te verminderen. Hierdoor kunnen SCC's zowel interne als externe voordelen genereren. (Allen et al., 2012)

In de praktijk zijn deze centra echter vaak niet financieel levensvatbaar gebleken. Dit komt doordat de extra kosten die binnen de toeleveringsketen ontstaan, een aanzienlijke barrière vormen. Bovendien is ook een te grote afhankelijkheid van subsidies een veel voorkomende valkuil voor SCC's. Browne et al. (2005) bevestigden dit in een uitgebreide literatuurstudie van 67 SCC-systemen, rekening houdend met operationele schema's, proeven en haalbaarheidsstudies. Ze constateerden inderdaad dat de meerderheid van SCC's niet in staat is om op de lange termijn te overleven. De belangrijkste redenen hiervoor zijn de hoge kosten van de extra overslag, denk hierbij aan hogere operationele kosten als gevolg van de dubbele afhandeling van goederen, en een gebrek aan toegevoegde waarde vanuit het perspectief van zowel vervoerders als ontvangers. Dit laatste komt mede doordat retailers, transporteurs en overheden allemaal op een manier kunnen profiteren van een SCC, maar ernaar streven om divergente doelstellingen te bereiken. Neem bijvoorbeeld een standaardscenario met ontvangers in een stedelijk gebied, transporteurs en een SCC, waarin de lokale overheid indirect de belangen behartigt van verschillende belanghebbenden zoals de inwoners. In dit systeem is het doel van de transporteurs en ontvangers om kosten te minimaliseren, terwijl het SCC streeft naar winstmaximalisatie en de overheid zich richt op het minimaliseren van milieukosten. Met uitzondering van de overheid zijn alle doelstellingen financieel van aard, wat aangeeft dat de transportsector voornamelijk kosten-gedreven is. (Browne et al., 2005; van Heeswijk et al., 2019)

Het traditionele concept van een overslagcentrum, waarbij goederen worden overgeladen in kleinere voertuigen, heeft over het algemeen geen succesvolle resultaten opgeleverd. Recentere ontwikkelingen, met de nadruk op het verbeteren van het voertuiggebruik en het beter integreren van SCC's in de toeleveringsketen, lijken meer potentieel te bieden (Browne et al., 2005). Enkel door een efficiënt gebruik van de middelen samen met het effectief organiseren van de distributieactiviteiten kan het implementeren van een SCC namelijk succesvol zijn (Janjevic & Ndiaye, 2017). Ook kunnen de operationele kosten worden verlaagd door beter gebruik te maken van state-of-the-art technologieën (van Heeswijk et al., 2019).

### 1.1.2 Coördinatie en integratie

De uitdagingen waarmee SCC's worden geconfronteerd, benadrukken de noodzaak aan een verbeterde coördinatie van de diverse actoren in de stedelijke bevoorradingsketen. In het complexe landschap van stedelijk goederenvervoer, waar meerdere belanghebbenden betrokken zijn met uiteenlopende doelstellingen en perspectieven, is effectieve coördinatie van cruciaal belang om vooruitgang te kunnen boeken in de ontwikkeling van (kosten-)efficiënte en milieuvriendelijke stedelijke transportsystemen (Taniguchi, 2014).

Bovendien vereist het aanpakken van de genoemde uitdagingen een integratie van verschillende besluitvormingsprocessen. Crainic et al. (2020) benadrukken het belang van samenwerking in stadslogistiek om tot een hyper-verbonden logistiek systeem te komen. Het fundamentele idee van stadslogistiek is daarom transportbelanghebbenden (transporteurs, logistieke dienstverleners, groothandelaren, detailhandelaren, particuliere klanten, enz.), materiaalstromen en activiteiten niet afzonderlijk te beschouwen, maar eerder als componenten van een "geïntegreerd" logistiek systeem dat geoptimaliseerd moet worden via onder meer voorraad- en transportbeheer. Het concept stadslogistiek benadrukt het aanpassen van het gedrag van zowel het systeem als de individuele belanghebbenden, met als doel de consolidatie van ladingen van diverse leveranciers binnen dezelfde voertuigen te optimaliseren, de routes te optimaliseren en de coördinatie van activiteiten en middelen te verbeteren. (Crainic & Montreuil, 2016; Kubek & Więcek, 2019)

Transportbeheer heeft in deze context betrekking op de routes die voertuigen, vertrekkend vanaf bijvoorbeeld een SCC, afleggen naar retailers en hoe deze geoptimaliseerd kunnen worden. Voertuigrouteringsproblemen definiëren een klasse van combinatorische optimalisatieproblemen die het optimaliseren van de routes van een wagenpark mogelijk maken, wanneer deze rondritten uitvoeren (Cattaruzza et al., 2017). Deze situatie vertegenwoordigt een substantieel deel van het voertuigenverkeer voor de distributie van goederen in steden. Eerder onderzoek heeft aangetoond hoe optimalisatie van voertuigrouting kan leiden tot aanzienlijke economische voordelen (Cattaruzza et al., 2017). Gezien de groeiende vraag naar goederenleveringen, is effectieve voertuigrouting van vitaal belang voor logistieke bedrijven om hun activiteiten te optimaliseren en de transportkosten te verlagen. Daarnaast kan het, door de meest efficiënte routes te identificeren en leveringen op optimale tijden te plannen, bijdragen aan het verminderen van congestie in stedelijke omgevingen (Iswari, 2023).

Naast het voertuigrouteringsprobleem is ook voorraadbeheer een cruciale factor in stadslogistiek, omdat het invloed heeft op de efficiëntie, kostenbeheersing en duurzaamheid van stedelijke toeleveringsketens. Overmatige voorraad kan leiden tot verspilling, terwijl onnodig transport kan bijdragen aan congestie en luchtvervuiling. Het optimaliseren van het voorraadbeheer in de stadslogistiek kan bijgevolg helpen bij het verminderen van deze negatieve milieu- en maatschappelijke effecten, terwijl het tegelijkertijd de algehele duurzaamheid van stedelijke toeleveringsketens verbetert. (Iswari, 2023)

### 1.1.3 Bestaande modellen

In de afgelopen jaren is uitgebreid onderzoek verricht naar de problematiek rond stadslogistiek. Dit heeft geleid tot de ontwikkeling van modellen, methoden en beslissingsondersteunende systemen

om evaluatie, planning en operationele aspecten van stadslogistieke systemen te verbeteren (Kubek & Więcek, 2019).

Binnen het domein van voertuigrouteringsproblemen is het “Two-echelon vehicle routing problem” (2E-VRP) een relevant model dat in de stadslogistiek gebruikt kan worden in situaties waarin een SCC aanwezig is. Het gebruik van een SCC zorgt namelijk voor het ontstaan van een netwerk bestaande uit twee echelons, waarin het SCC de vrachtstromen van zowel binnen als buiten de stedelijke gebieden coördineert (Cuda et al., 2015; Farias et al., 2021). Het eerste echelon behandelt leveringen van leveranciers aan de SCC's, terwijl het tweede echelon de distributie tussen SCC's en retailers bevat (Farias et al., 2021). De SCC's kunnen zoals eerder vermeld ook fungeren als locatie waar opslag-, samenvoegings-, consolidatie- of overslagactiviteiten plaatsvinden (Cuda et al., 2015).

Het doel van 2E-VRP's is om een reeks primaire (eerste echelon) en secundaire (tweede echelon) routes te vinden die voldoen aan de vraag van de retailers, terwijl de totale distributiekosten worden geminimaliseerd. Een van de meest bestudeerde varianten van een 2E-VRP is het “capacitated 2E-VRP” (2E-CVRP). In een 2E-CVRP zijn op specifieke locaties één leverancier, een set SCC's en een set retailers beschikbaar. Het doel van een 2E-CVRP is zoals eerder vermeld het vinden van een reeks routes op beide niveaus zodat aan de vraag van alle retailers wordt voldaan én tegelijkertijd de capaciteitsbeperkingen van SCC's en voertuigen niet worden geschonden. Dit terwijl de totale distributiekosten worden geminimaliseerd. Die totale kosten worden bepaald door twee componenten: de kosten van de gebruikte primaire en secundaire routes en de verwerkingskosten bij de SCC's. De voertuigen die tot het eerste echelon behoren worden “primaire voertuigen” genoemd en voertuigen in het tweede echelon “secundaire voertuigen”. Een wagenpark van grotere primaire voertuigen is gevestigd bij de leverancier, terwijl een beperkt aantal kleinere secundaire voertuigen wordt gedeeld door de SCC's. De capaciteitsbeperking voor elk SCC wordt daarom uitgedrukt in termen van het maximaal aantal secundaire voertuigen dat vanaf het SCC kan worden gerouteerd. (Cuda et al., 2015)

Voorraadbeheer is een minder onderzocht aspect in de literatuur rond stadslogistiek en multi-echelon routeringsproblemen (Farias et al., 2021; Iswari et al., 2023). Desondanks is efficiënt voorraadbeheer een cruciaal onderdeel van stadslogistiek, omdat het kan bijdragen aan het optimaliseren van de beschikbare ruimte en middelen (Farias et al., 2021). Door onder meer te bepalen wanneer en hoeveel producten er geleverd moeten worden, kan het namelijk de behoefte aan overmatige voorraad verminderen en tegelijkertijd de transportkosten minimaliseren (Farias et al., 2021).

Een voorbeeld van een model dat wel rekening houdt met de voorraad bij het opstellen van routes is het “Inventory-routing problem” (IRP). Voorraadrouteringsproblemen voegen een tijdsdimensie en voorraadbeheer toe aan de klassieke routeringsproblemen (Archetti & Bertazzi, 2021). Het IRP is een optimalisatieprobleem waarbij leveringen aan een reeks retailers gepland worden door tegelijkertijd de leveringsroutes en hoeveelheden te bepalen. Dit om de distributie- en voorraadbeheerkosten te minimaliseren en voldoende voorraad bij de retailers te garanderen. IRP integreert voertuigrouting en voorraadbeheer, waarbij een SCC dit tegelijkertijd beheert en optimaliseert, rekening houdend met diverse beperkingen. (L. C. Coelho et al., 2014)

Daarnaast hebben recent papers het “Two-echelon inventory-routing problem” (2E-IRP) binnen een stedelijke context geïntroduceerd. In dit scenario beheren SCC’s de voorraadniveaus van retailers, wat vergelijkbaar is met het IRP. Echter, gebeurt dit in een multi-echelon context met een geïntegreerde besluitvormingsaanpak die tegelijkertijd de voorraad en routing optimaliseert in meerdere echelons. Dit wil zeggen dat het SCC beslist wanneer en hoeveel te leveren aan de retailers, inclusief de bijbehorende bezorgroutes. Het feit dat het deze beslissingen tegelijkertijd optimaliseert, resulteert in meer geconsolideerde en efficiëntere leveringen. Het SCC kan meerdere bestellingen van retailers bundelen door het centraliseren van het besluitvormingsproces en het creëren van geoptimaliseerde bezorgroutes die de totale transportkosten verlagen. (Iswari, 2023)

## 1.2 Onderzoeksvraag

Voorraadrouteringsproblemen en de bijbehorende modellen hebben het potentieel om de coördinatie van de diverse belanghebbenden en de integratie van beslissingen te helpen realiseren. Hierdoor kunnen de genoemde uitdagingen in de stadslogistiek beter aangepakt worden. Tegelijkertijd wordt de financiële levensvatbaarheid van SCC's verhoogd door het verlagen van de logistiek kosten als gevolg van het maken van efficiëntere beslissingen door de gebruikte IRP-modellen.

Het doel van deze masterproef is om een overzicht te bieden van de huidige stand van de literatuur over Voorraadrouteringsproblemen en de toekomstige onderzoeksrichtingen hieromtrent, zoals het 2E-IRP. Hiervoor zal een grondige literatuurstudie uitgevoerd worden. Verder wordt getracht om aan de hand van een wiskundig model inzichten te verwerven in wanneer de integratie van voorraad- en routeringsbeslissingen het meest zinvol is. Specifiek wordt dit onderzocht in een stedelijke B2B-context waarin een SCC fungeert als schakel tussen leveranciers en retailers.

Op die manier kon de volgende centrale onderzoeksvraag worden opgesteld:

"Hoe draagt het rekening houden met voorraad in combinatie met rittenplanning bij aan het reduceren van kosten in een stedelijk distributiesysteem met twee echelons?"

Vervolgens werden de volgende deelvragen opgesteld:

Deelvraag 1: "Wat is de huidige stand van zaken van de IRP-literatuur?"

Deelvraag 2: "Wat zijn de voor- en nadelen van SCC's?"

Deelvraag 3: "Welke factoren beïnvloeden het succes van SCC's?"

Deelvraag 4: "Hoe worden voorraadbeheer en rittenplanning gemodelleerd in de literatuur met betrekking tot twee-echelon distributienetwerken?"

Deelvraag 5: "Wat is het effect van het optimaliseren van leveringen aan een SCC op de totale voorraad- en transportkosten in het eerste echelon van een stedelijk distributiesysteem met twee echelons?"

Deze deelvragen helpen om een antwoord te formuleren op de centrale onderzoeksvraag. De eerste deelvraag dient om een overzicht te krijgen van de huidige IRP-literatuur en de rol die voorraadbeheer kan spelen. Met de tweede deelvraag wordt getracht een overzicht te krijgen van de voor- en nadelen van SCC's die in de literatuur naar voren komen. De derde deelvraag richt zich op de factoren die het succes van SCC's beïnvloeden en op situaties die SCC's het grootste potentieel op succes bieden. Met de vierde deelvraag wordt er aandacht besteed aan de verschillende modellen die er bestaan voor voorraad- en rittenplanning in de literatuur rond twee-echelon distributienetwerken. Ten slotte onderzoekt de vijfde deelvraag, met het oog op het praktijkgedeelte van deze masterproef, het effect van het optimaliseren van de leveringen aan het SCC op de totale voorraad- en transportkosten in het eerste echelon van een stedelijk distributiesysteem met twee echelons.

## 1.3 Methodologie

In dit onderdeel van de masterproef worden de methodologie en tools besproken die worden toegepast om een antwoord te formuleren op de centrale onderzoeksvraag. De masterproef is opgebouwd uit twee onderdelen. Allereerst wordt er een grondige literatuurstudie uitgevoerd om inzicht te verkrijgen in de huidige stand van de literatuur rond Voorraadrouteringsproblemen (IRP's) en Stedelijke Consolidatiecentra (SCC's). Dit is tevens bedoeld om voldoende informatie te vergaren om de deelvragen te kunnen beantwoorden. Vervolgens is er een praktijkgedeelte waarin een wiskundig model opgesteld zal worden om de bevoorrading van een SCC door leveranciers te optimaliseren. Dit model zal zich baseren op een reeds geoptimaliseerd tweede echelon.

### 1.3.1 Literatuurstudie

De literatuurstudie zal zich concentreren rond twee hoofdonderwerpen, namelijk Stedelijke Consolidatiecentra (SCC's) en Voorraadrouteringsproblemen (IRP's). Daarnaast zal in een onderdeel over twee-echelon netwerken, de literatuur rond routerings- en voorraadmodellen in deze context verkend worden. Deze onderwerpen zullen specifiek onderzocht worden in een Business-to-Business (B2B)-context.

#### 1.3.1.1 Informatiebronnen en databases

Om relevante literatuur rond deze onderwerpen te vinden, zullen de databases van Bibliotheek UHasselt en Google Scholar als belangrijkste bronnen van informatie gebruikt worden. Deze keuze is gebaseerd op de beschikbaarheid van kwaliteitsvolle en objectieve papers. Beide databases bieden tevens afdoende mogelijkheden om de data te kunnen filteren op basis van de gewenste zoekcriteria.

#### 1.3.1.2 Sleutelwoorden en zoektermen

Voor het opstellen van de zoektermen is er vertrokken vanuit enkele sleutelwoorden die aansluiten bij de centrale onderzoeksvraag en deelvragen. Aangezien de meeste relevante papers in het Engels geschreven zijn, worden deze sleutelwoorden ook in het Engels opgesteld. Voorbeelden hiervan zijn: "Urban Consolidation centre (UCC)", "Inventory Routing Problem (IRP)", "City Logistics", "City Hub", enzovoort.

#### 1.3.1.3 Inclusie- en exclusiecriteria

Als inclusiecriteria is bepaald dat alleen papers worden geselecteerd die zijn gepubliceerd vanaf het jaar 2000. Dit omdat het gaat om een relatief recent topic in de literatuur dat vooral aan aandacht gewonnen heeft sinds het begin van de 21<sup>ste</sup> eeuw. Eveneens wordt dit gedaan om te vermijden dat papers geselecteerd worden waarvan de conclusies reeds achterhaald zijn. Verder is ervoor gekozen om in het geval van reële case studies enkel papers te selecteren uit de westerse wereld, waar het economisch klimaat vergelijkbaar is met elkaar. Dit omdat de stedelijke gebieden, waar dit onderwerp zich afspeelt, anders te veel afwijken van elkaar en conclusies niet veralgemeenbaar zijn doordat er een grotere kans op uitzonderingen is. Ten slotte moeten de papers peer-reviewed zijn opdat de objectiviteit en kwaliteit gewaarborgd kunnen worden.

Als exclusiecriteria worden er enkel papers gebruikt waarvan de volledige tekst beschikbaar is in het Nederlands of Engels. Dit is gebaseerd op het feit dat het merendeel van de papers in het Engels zijn geschreven en dat papers die in andere talen geschreven zijn niet afdoende geanalyseerd kunnen worden door een gebrek aan kennis van de desbetreffende talen.

#### 1.3.1.4 Selectiestrategie

Zodra een paper aan de inclusie-en exclusiecriteria voldoet, worden de titels en abstracten ervan geëvalueerd. Op basis hiervan wordt bepaald of de bron al dan niet geschikt is voor deze masterproef. Indien relevant, worden deze bronnen in hun volledigheid gelezen en opgeslagen met behulp van de Zotero-software. Deze software wordt ook gebruikt voor het maken van referenties naar specifieke elementen uit de gebruikte bronnen.

Ten slotte wordt er op basis van belangrijke papers voor deze masterproef "Citation Chaining" toegepast. Citation chaining is een proces waarbij er één goede informatiebron, zoals een paper die nauw aansluit bij het onderwerp, gebruikt wordt om extra relevante bronnen te vinden in de referentielijst (Staiger, z.d.). Dit wordt backward chaining genoemd. Bij forward chaining worden bijkomende bronnen geïdentificeerd die de paper hebben geciteerd. Door zowel aan forward als backward searching te doen kunnen mogelijk nog meer relevante papers geïdentificeerd worden.

#### 1.3.2 Praktijkgedeelte

Na de literatuurstudie zal in het praktijkgedeelte van deze masterproef een algoritmisch model worden opgesteld om, gegeven een reeds geoptimaliseerd tweede echelon, de leveringen aan het SCC te optimaliseren op het vlak van leveringshoeveelheden en leveringstijden. Hiervoor zal er ook een opslagcapaciteit zijn in het SCC, wat consolidatiemogelijkheden biedt. Dit model zal vervolgens worden toegepast op data verstrekt door Titi Iswari, gebaseerd op haar doctoraatsonderzoek. Deze data bevat onder andere de geoptimaliseerde leveringshoeveelheden en leveringstijden voor het tweede echelon, bestaande uit een SCC en retailers, op basis van een door haar opgesteld IRP-model.

Het model zal via meerdere experimenten worden getest in de LINGO-software. Vervolgens zullen op basis van de geoptimaliseerde waarden voor de variabelen in het model verschillende statistieken worden berekend met Excel om de resultaten te analyseren. Hiermee kunnen de kosten- en efficiëntievoordelen van het gebruik van het model op het eerste echelon worden aangetoond. Dit gebeurt voor meerdere configuraties van het aantal retailers en met verschillende opslagcapaciteiten van het SCC. Uiteindelijk zullen deze verschillende scenario's worden vergeleken om te bepalen welk scenario het meest gunstig is op het gebied van kosten en het gebruik van beschikbare ruimte en middelen.

## 2 Stedelijke Consolidatiecentra (SCC's)

In het domein van de stadslogistiek hebben Stedelijke Consolidatiecentra (SCC's) aanzienlijke aandacht gekregen als mogelijke oplossing voor uitdagingen in de stedelijke goederenlogistiek. Deze centra, vaak gepresenteerd als cruciale schakels, omvatten een scala aan functies, variërend van opslagfaciliteiten tot transportdiensten en voorraadbeheer. Om de complexiteit van SCC's beter te begrijpen, wordt in dit deel van de literatuurstudie een grondige analyse uitgevoerd. Dit onderdeel is opgebouwd rond verschillende kernaspecten van SCC's zoals hun definitie, doel en de diverse voor- en nadelen die ze met zich meebrengen.

De focus ligt niet alleen op het theoretische concept van SCC's, maar ook op factoren die het succes ervan beïnvloeden, vooral met betrekking tot hun financiële levensvatbaarheid. Terwijl het merendeel van de literatuur de voordelen van SCC's benadrukt, worden ook de mogelijke kanttekeningen en uitdagingen die zich voordoen bij hun implementatie en functioneren belicht.

Opvallend is dat in veel onderzoeken over SCC's de nadruk minder ligt op voorraadbeheer, ondanks het belang van dit aspect in het bredere logistieke kader. Dit onderdeel over SCC's heeft hierdoor als doel deze lacune te identificeren en de rol van voorraadbeheer binnen SCC's nader te onderzoeken. Het streeft ernaar inzichten te bieden met betrekking tot de factoren die het succes van SCC's beïnvloeden, terwijl het tevens de gebieden van mogelijke verbetering aanstipt die nog onvoldoende aandacht hebben gekregen binnen de bestaande literatuur.

### 2.1 Basisprincipes van SCC's: Definitie, Doel en Categorieën

Stedelijke Consolidatiecentra (SCC's) vormen een van de meest onderzochte en geïmplementeerde initiatieven op het gebied van stadslogistiek. Ze hebben het potentieel om de milieu- en sociale uitdagingen van stedelijk goederenvervoer te verminderen, maar kunnen ook de efficiëntie van distributiesystemen verbeteren en een overstap naar milieuvriendelijkere voertuigen mogelijk maken (Allen et al., 2012). In het eerder besproken inleidende hoofdstuk werd het SCC-initiatief gepresenteerd als een logistieke faciliteit gelegen in een stedelijk gebied, van waaruit geconsolideerde leveringen binnen dat gebied worden uitgevoerd. Daarnaast kunnen in de SCC faciliteiten ook een scala aan andere bijkomende logistieke en retaildiensten met een toegevoegde waarde worden aangeboden. Er zijn verschillende voorbeelden van dergelijke SCC's in het Verenigd Koninkrijk (bijvoorbeeld het London Construction Consolidation Centre, het Heathrow Retail Consolidation Centre en het Broadmead Retail Consolidation Centre), maar ook in Frankrijk (Parijs, La Rochelle en Monaco), België (bijvoorbeeld het CityDepot met locaties in Antwerpen, Brussel, Leuven, Charleroi en Luik) en in Italië (in Milaan en Padua). Echter, uit de literatuurstudie van Browne et al. (2005) omtrent SCC's blijkt dat het begrip "stedelijk consolidatiecentrum" voor verschillende belanghebbenden diverse interpretaties kent. Het is tevens opvallend dat veel literatuur geen concrete definitie geeft van dit concept. Bovendien zijn er, naast verschillen in definities doorheen de tijd en tussen landen, verschillen tussen de definities van specifieke projecten of voorstellen. (Allen et al., 2012; Björklund & Johansson, 2018; Browne et al., 2005; McKinnon et al., 2015)

Hoewel er talrijke definities en beschrijvingen van Stedelijke Consolidatiecentra (SCC's) bestaan, vertonen ze over het algemeen veel gelijkenissen. Een SCC kan het best worden omschreven als

"een logistieke faciliteit die zich in de relatieve nabijheid van het geografische gebied bevindt dat het bedient, of dat nu een stadscentrum, een heel stedelijk gebied of een specifieke locatie (bv. een winkelcentrum of luchthaven) is, van waaruit geconsolideerde leveringen binnen dat gebied worden uitgevoerd" (Browne et al., 2005). Ville et al. (2013) hanteren dezelfde definitie maar voegen overheidsinstanties toe als de frequente financiële verstrekkers van SCC's. Een vergelijkbare definitie is dat SCC's "alle initiatieven omvatten die gebruik maken van een faciliteit, waarbij goederenstromen van buiten de stad worden geconsolideerd met als doel binnenstedelijke vervoersactiviteiten te bundelen" (van Rooijen & Quak, 2010). Geïnspireerd door deze voorgaande definities omschrijft Johansson et al. (2017) een SCC als een logistieke faciliteit die een stadsgebied geheel of gedeeltelijk bedient en waarvan de instroom van buiten de stad wordt geconsolideerd en herschikt om efficiënter transport binnen de stad mogelijk te maken. Betreffende de klanten van SCC's, hiermee worden in de paper van Johansson et al. (2017) alle potentiële belanghebbenden bedoeld die baat zouden kunnen hebben bij het gebruik van een SCC, waaronder retailers. (Allen et al., 2012; Browne et al., 2005; Johansson & Björklund, 2017)

Logistieke bedrijven met leveringen in het stedelijke gebied kunnen hun ladingen overladen bij het SCC en zo voorkomen dat ze het drukke stedelijke gebied moeten betreden. De SCC-operator sorteert en consolideert de diverse ladingen van een aantal logistieke bedrijven en levert ze, vaak via milieuvriendelijke voertuigen, af volgens een afgesproken leveringspatroon. Het belangrijkste doel van de SCC's is dan ook in grote lijnen het vermijden van de noodzaak voor slecht beladen vrachtwagens om deelladingen af te leveren in stedelijke gebieden (of dat nu een stadscentrum, een hele stad of een specifieke locatie zoals een winkelcentrum is) en daarmee het verkeer van vrachtwagens verminderen. Dit doel kan worden bereikt door goederen bij het SCC in of nabij het stedelijk gebied over te laden en te consolideren in geschikte voertuigen met een hoge beladingsgraad voor de uiteindelijke levering in het stedelijk gebied. Het SCC biedt ook de mogelijkheid om elektrische en alternatief aangedreven milieuvriendelijkere vrachtwagens te laten rijden voor dit stedelijke bezorgwerk. Hierdoor wordt de invoering van SCC's gezien als een aantrekkelijk beleid dat gericht is op het hervormen van zowel de kwantiteit als de kwaliteit van leveringen. (Allen et al., 2012; Browne et al., 2005; Iswari, 2023; Janjevic & Ndiaye, 2017; McKinnon et al., 2015)

Gebaseerd op het type operatie en het geografische gebied dat door SCC's wordt bediend, hebben Browne et al. (2005) en Allen et al. (2012) de volgende drie categorieën SCC's opgesteld (Allen et al., 2012; Browne et al., 2005; Paddeu, 2017):

1. SCC's die een stedelijk gebied geheel of gedeeltelijk bedienen: deze SCC's zijn doorgaans gericht op de levering van retailproducten en kunnen variëren in termen van het geografische gebied dat ze bedienen en het aantal bedrijven dat de SCC-regeling toepast. Het geografische gebied kan variëren van smalle historische centra van stedelijke gebieden tot specifieke winkelgebieden of zelfs hele steden. Het aantal bedrijven dat de SCC-regeling toepast, kan variëren van één bedrijf tot meerdere bedrijven.
2. SCC's op één locatie met één verhuurder: voorbeelden hiervan zijn SCC's op luchthavens en in winkelcentra. Deze SCC's verschillen op de volgende manieren van degenen die een stedelijk gebied in zijn geheel of gedeeltelijk bedienen (d.w.z. het eerste type):

- a. De locaties worden gebouwd als één ontwikkeling, waardoor het SCC mogelijk kan worden opgenomen in het ontwerp van de locatie.
  - b. De verhuurder kan erop aandringen dat huurders het SCC gebruiken.
  - c. De losplaatsen bevinden zich meestal weg van de straat in een speciaal ontworpen aflevergebied met toegang via één route.
  - d. Het SCC kan mogelijk zelf-financierend worden gemaakt door middel van huurstructuren en verwerkingskosten.
3. **Bouwproject SCC's:** dit zijn SCC's die worden gebruikt voor niet-retaildoeleinden, zoals het consolideren van bouwmaterialen voor grote bouwprojecten. Dergelijke SCC's kunnen één groot bouwproject of meerdere projecten omvatten en worden doorgaans beperkt tot een specifiek geografisch gebied binnen de stad. Dit type SCC is meestal slechts tijdelijk operationeel, gedurende de periode waarin de specifieke activiteiten die verband houden met het SCC plaatsvinden.

De overgrote meerderheid van de SCC's bedient een stedelijk gebied in zijn geheel of gedeeltelijk. Deze masterproef zal zich daarom voornamelijk op dit type SCC richten. Er zijn echter ook voorbeelden geïdentificeerd van SCC's die een enkele locatie en bouwplaatsen bedienen. Elk van deze drie soorten SCC kan enkel relatief eenvoudige consolidatie- en leveringsdiensten aanbieden of tevens een breder scala aan logistieke diensten met toegevoegde waarde. (Allen et al., 2012; Browne et al., 2005)

Na het introduceren van de belangrijkste basisprincipes van SCC's, zal het verdere verloop van dit onderdeel over SCC's er als volgt uitzien: allereerst zal er dieper ingegaan worden op de financiën van SCC's. Hierbij komen zowel inkomsten als kosten aan bod, evenals de financiële levensvatbaarheid en enkele criteria voor succes. Vervolgens wordt er een overzicht gegeven van de diensten met toegevoegde waarde die toegepast kunnen worden. Daarna zal er een algemene stand van zaken gegeven worden omtrent de literatuur rond SCC's, samen met geïdentificeerde lacunes in deze literatuur. Ten slotte zullen, op basis van de bestaande literatuur, de belangrijkste voor- en nadelen opgesteld worden.

## 2.2 Financiën

### 2.2.1 Kanttekening

Ondanks het potentieel van SCC's om zowel de milieu- en sociale uitdagingen als het aantal vrachtwagenkilometers van stedelijk goederenvervoer te verminderen, zijn veel van deze projecten toch van korte duur geweest. Het ontbreekt bij SCC-projecten namelijk vaak aan kwantitatieve beoordelingen, wat leidt tot financiële uitdagingen tijdens de uitvoering ervan. In een uitgebreide literatuurstudie analyseerden Browne et al. (2005) 67 SCC-schema's, variërend van operationele projecten tot haalbaarheidsstudies. Zij constateerden dat de overgrote meerderheid van de SCC's niet in staat is op de lange termijn te overleven. De belangrijkste redenen voor het falen zijn de hoge kosten voor uitbesteding door de extra overslag en een gebrek aan toegevoegde waarde vanuit het perspectief van zowel transporteurs als ontvangers. De bovengenoemde bronnen geven aan dat SCC's vaak niet in staat zijn om een voldoende hoge doorvoer te genereren om het break-evenniveau

te bereiken dat nodig is voor een duurzaam bedrijfsmodel. Het onvermogen om voldoende gebruikers aan te trekken wordt mede veroorzaakt door een gebrek aan externe ondersteuning. In de opstartfase van een SCC verstrekken overheden vaak subsidies, maar wanneer deze financiële steun wordt beëindigd, is het SCC vaak niet in staat om te overleven. Volgens de paper van Janjevic et al. (2017) over de financiële levensvatbaarheid van SCC-projecten heeft het mislukken van SCC-projecten in het verleden ertoe geleid dat er grote bezorgdheden ontstaan zijn omtrent hun financiële levensvatbaarheid. Tal van auteurs (Allen et al., 2012; Browne et al., 2005; Taniguchi, 2014) wijzen dan ook op de afhankelijkheid van deze voorzieningen van overheidssubsidies. Dit financiële aspect van SCC's zal in dit onderdeel verder worden onderzocht. (Browne et al., 2005; Iswari, 2023; Janjevic & Ndiaye, 2017; van Heeswijk et al., 2019)

### 2.2.2 Inkomsten

Allereerst is het van belang een beeld te krijgen van hoe SCC's inkomsten genereren en waar deze uit bestaan. In het algemeen identificeerden Van Heeswijk et al. (2019) in hun literatuurstudie twee businessmodellen voor SCC's. In het eerste, vroegere, business model van SCC's, richten deze zich op transporteurs als klanten die hun stedelijke leveringen uitbesteden aan het SCC door hen een centraal consolidatiepunt te bieden. De kosten voor de last-mile distributie zijn onevenredig hoog voor transporteurs vanwege de lagere rijsnelheden, tijdrovende lossingen, de onderbenutte voertuigcapaciteit en de beperkende lokale regelgeving. Ondanks deze stimuli is de prijs van uitbesteding vaak te hoog voor transporteurs. Het SCC biedt te weinig toegevoegde waarde en potentieel hoge meerkosten (indien zonder substantiële overheidssubsidies) voor de transporteurs die het probeert aan te trekken. Ook ontbreekt het dit model aan stimulansen om transporteurs aan te trekken die huiverig zijn om merkzichtbaarheid en het directe contact met hun klanten te verliezen wanneer ze zich aansluiten bij een SCC. Bovendien worden de ontvangers (retailers) in de stad niet betrokken bij de SCC-regeling en zijn ze ook niet op de hoogte van mogelijke duurzamere opties bij het ontvangen van hun goederen. (Lin et al., 2016; van Heeswijk et al., 2019; van Rooijen & Quak, 2010)

In het tweede, recentere, businessmodel richt het SCC zich op kleinere, onafhankelijke, ontvangers (retailers) in het stedelijk gebied, die het SCC vervolgens als afleveradres kiezen. Op deze manier fungeert het SCC als enige toegangspoort tot de ontvangers en functioneert het als een klantencoalitie. Alle transporteurs die zaken willen doen met ontvangers binnen een SCC-coalitie moeten hun goederen erdoorheen laten lopen en ermee instemmen de kosten van last-mile leveringen met het SCC te delen, anders lopen ze het risico omzet te verliezen. Dit is een duurzamer businessmodel. Door meerdere leveringen te bundelen, bespaart de ontvanger tijd en kosten voor de verwerking van goederen. Echter, aangezien de verzendkosten doorgaans al zijn opgenomen in de bestelprijzen, zijn ook hier de kosten voor uitbesteding vaak hoger dan de te boeken efficiëntiewinsten. Het zijn de diensten met toegevoegde waarde, zoals tijdelijke opslag en afvalinzameling, die de belangrijkste verdiensten van het SCC zijn voor de retailers. Het hebben van aanvullende diensten bij het SCC kan zowel het algemene gebruik als de inkomsten verhogen en daarmee de rol die het SCC in het stedelijk gebied speelt vergroten. (Allen et al., 2012; Lin et al., 2016; van Heeswijk et al., 2019; van Rooijen & Quak, 2010)

Van Heeswijk et al. (2019) concludeerden dat het SCC in staat is om de hoogste inkomsten te behalen door eerst transporteurs te overtuigen hun haltes uit te besteden en vervolgens diensten met toevoegende te verkopen aan de ontvangers in de stad. Die diensten worden beschouwd als het meest faciliterende aspect voor een SCC om inkomsten te genereren. Bovendien wordt vaak benadrukt dat een grote schaal en de daaruit voortvloeiende schaalvoordelen noodzakelijk zijn om voldoende inkomsten te genereren en een SCC levensvatbaar te maken. Deze schaalvoordelen kunnen worden bereikt door onder meer een hoge dichtheid aan ontvangers, een groot aantal transporteurs en een voldoende volume aan goederen dat via het SCC wordt verwerkt. (Björklund & Johansson, 2018; Paddeu, 2017; van Heeswijk et al., 2019)

De inkomsten van SCC's kunnen bestaan uit de volgende elementen, die afhankelijk zijn van tal van factoren als locatie of type dienst (Janjevic & Ndiaye, 2017; van Heeswijk et al., 2019):

- De prijs die de transporteur in rekening wordt gebracht voor het uitbesteden van zijn last-mile distributie: vaste vergoeding per uitbestede leveringsstop, identiek voor elke vervoerder.
- De prijs voor de basisdienst: vaste vergoeding voor de basisdienst van gebundelde leveringen in rekening gebracht aan de ontvanger, identiek voor elke ontvanger.
- De prijs voor het uitvoeren van diensten met toegevoegde waarde voor een ontvanger: variabele vergoeding in rekening gebracht aan de ontvanger.
- Een subsidie (optioneel): percentage van de totale prijzen die aan transporteurs en ontvangers in rekening worden gebracht. (Enkel voor de basisdienst)

### 2.2.3 Kosten

Aangezien de kosten die gepaard gaan met SCC's een veelgenoemd argument zijn in de literatuur voor het mislukken van SCC-implementaties, wordt er in deze sectie getracht een overzicht te geven van de (extra) kosten die een SCC met zich meebrengt. Echter, ondanks het feit dat de financiële levensvatbaarheid een van de belangrijkste problemen is bij SCC-projecten, is informatie over de kosten en baten ervan schaars. (Janjevic & Ndiaye, 2017)

SCC's staan erom bekend duur te zijn om op te zetten en te exploiteren. Een SCC brengt namelijk opstartkosten met zich mee, gevolgd door operationele kosten voor het beheer ervan. Voorbeelden van kostenelementen voor een SCC die in de literatuur worden genoemd, omvatten personeelskosten, elektriciteitskosten, bijkomende administratie, extra goederenbehandeling, huur en onderhoud van de faciliteiten. Janjevic et al. (2017) hebben om de financiële levensvatbaarheid van SCC-regelingen te onderzoeken, deze kostenelementen met betrekking tot de exploitatie geïdentificeerd en gecategoriseerd volgens de volgende types: infrastructuurkosten, voertuigkosten, personeelskosten (chauffeurs, operationeel en administratief personeel en managers), uitrustingskosten en overheadkosten. (Björklund & Johansson, 2018; Browne et al., 2005; Janjevic & Ndiaye, 2017; Johansson & Björklund, 2017; Lin et al., 2016)

In meer algemene termen kunnen de potentiële meerkosten die verband houden met consolidatie in SCC's de volgende elementen bevatten (Browne et al., 2005; McKinnon et al., 2015):

- Kapitaal- en exploitatiekosten van SCC's.

- Kosten door een extra goederenbehandelingsfase in de toeleveringsketen: kostenboete door een toename van de leveringskosten en soms een tijdsboete (afhankelijk van de integratie van het SCC in de supply chain).
- Kosten door veiligheids-, aansprakelijkheids- en klantenserviceproblemen die verband houden met extra bedrijven die de goederen behandelen.

De voornoemde kosten van SCC's worden in de literatuur op verschillende manieren gesegmenteerd. In wat nu volgt zullen enkele van deze kostcomponenten worden voorgesteld. Zo kunnen de door Janjevic et al. (2017) geïdentificeerde kostcategorieën (personeelskosten, infrastructuurkosten, etc.) ook gegroepeerd worden op basis van het type activiteit dat door het SCC wordt uitgevoerd. Op deze manier hebben Janjevic et al. (2017) ze gesegmenteerd in drie afzonderlijke elementen (Janjevic & Ndiaye, 2017):

- Overladingsactiviteiten: de kosten van infrastructuur, operationeel en administratief personeel en uitrusting.
- Distributieactiviteiten: de kosten van voertuigen en chauffeurs.
- Algemene uitgaven: de kosten van leidinggevend personeel en overhead.

Ook Van Heewijk et al. (2019) verdelen de kosten van het SCC in drie gelijkaardige componenten, namelijk:

- Verwerkingskosten: inclusief huur, transportwerktuigen en personeelsuren. (Sterk afhankelijk van de behandelde volumes en de bijbehorende schaalvoordelen, schattingen in de literatuur lopen sterk uiteen.)
- Transportkosten
- Kosten voor diensten met toegevoegde waarde

Aangezien zoals eerder vermeld een veelgehoord bezwaar tegen SCC's is dat ze tot hogere kosten in de leveringsoperatie zullen leiden, is het belangrijk om de bredere implicaties van dergelijke regelingen te bespreken met zowel de wegtransportsector als de retailers. Dit kan helpen aantonen dat door het gebruik van SCC's kosten in andere delen van hun operatie kunnen worden verlaagd. Dergelijke reducties kunnen bijvoorbeeld worden bereikt door minder tijd te besteden aan leveringen in drukke stadsgebieden, kortere reistijden en een hogere voertuigbenutting, evenals de mogelijkheid van nachtleveringen in SCC's (wanneer hun klanten gesloten zijn). Door consolidatie kan een SCC ook efficiënter uitgaand transport faciliteren en er zo in slagen om, in plaats van kosten te doen stijgen, kosten zoals brandstof, verzekering, onderhoud en chauffeurskosten te verlagen. Efficiëntiewinsten en extra omzet kunnen ook worden behaald met de diensten met toegevoegde waarde die door een SCC kunnen worden geleverd. In dit opzicht is een van de belangrijkste overwegingen hoe de kosten en baten van een SCC-oplossing als geheel moeten worden toegerekend en niet alleen de kostenimpact op een deel van de toeleveringsketen of een enkele speler. (Allen et al., 2012; Björklund & Johansson, 2018; Browne et al., 2005; Johansson & Björklund, 2017)

#### 2.2.4 Financiële levensvatbaarheid

Gegeven de gepresenteerde inkomsten en kosten die door SCC's worden gegenereerd, volgt nu de uitwerking van enkele factoren die de financiële levensvatbaarheid van SCC's in negatieve zin

beïnvloeden. Die levensvatbaarheid blijft namelijk, zoals eerder gesteld bij de sectie kanttekening (Sectie 2.2.1), een van de meest uitdagende vraagstukken die grotendeels onopgelost blijft (McKinnon et al., 2015). Er zijn hierover dan ook zorgen ontstaan als gevolg van het falen van verscheidene projecten in het verleden. (Allen et al., 2012; Janjevic & Ndiaye, 2017)

Het is allereerst belangrijk op te merken dat veel stedelijk vrachtvervoer al geconsolideerd wordt op bedrijfsniveau of door pakketdiensten, waardoor de voordelen van het lijden van deze stromen door een consolidatiecentrum mogelijk beperkt zijn (McKinnon et al., 2015). Veel goederenstromen zijn namelijk al efficiënt georganiseerd, overladingen kan ze juist minder efficiënt maken (van Rooijen & Quak, 2010). Daarnaast, hoewel Björklund en Gustafsson (2015) naar voren brengen dat een bijkomend voordeel van het gebruik van een SCC een veiligere omgeving voor ontvangers is door een afname van het aantal vrachtwagens, een opmerkelijk nadeel is dat, vanuit sociaal oogpunt, er meer verkeer in de buurt van een SCC is als gevolg van het toegenomen inkomend vrachtvervoer (Browne et al., 2005). In die zin is de plaatsing van een SCC van cruciaal belang. (Björklund & Gustafsson, 2015; Browne et al., 2005; Johansson & Björklund, 2017)

Daarnaast richten veel initiatieven op het gebied van stadslogistiek richten zich veelal op technische, ecologische en operationele haalbaarheid (zoals met emissievrije voertuigen), terwijl de afweging van economische haalbaarheid vaak zwak of zelfs afwezig is. Hierdoor hebben stedelijke logistieke oplossingen te lijden onder het feit dat ze geen levensvatbare zakelijke opportuniteiten bieden voor potentiële gebruikers (Aastrup et al., 2012). Deze kwestie werd ook aangehaald in de sectie over inkomsten (Sectie 2.2.2), waarin gesteld werd dat de huidige SCC businessmodellen te weinig toegevoegde waarde bieden tegen te hoge kosten voor uitbesteding. Die zakelijke opportuniteiten zijn niettemin noodzakelijk om de financiële haalbaarheid te waarborgen en succes op lange termijn te behalen. Malhene et al. (2012) hebben bijgevolg geconcludeerd dat het belangrijkste obstakel van SCC's hun fragiele of zelfs afwezige businessmodel is, wat een veelvoorkomend struikelblok vormt binnen stedelijke logistieke initiatieven. De algemene consensus is dat SCC's op eigen kracht financieel levensvatbaar moeten zijn op middellange tot lange termijn, aangezien overheidssubsidies niet noodzakelijkerwijs een wenselijke oplossing zijn. (Allen et al., 2012; Johansson & Björklund, 2017; Lin et al., 2016; Paddeu, 2017; van Heeswijk et al., 2019; van Rooijen & Quak, 2010)

Indien er rekening gehouden wordt met de verschillende SCC-types kan er geconstateerd worden dat SCC's voor bouwprojecten en SCC's die één locatie met één verhuurder bedienen, minder financiële problemen ondervinden in vergelijking met SCC's die een deel of het geheel van een stedelijk gebied bedienen. De verhuurder van een winkelcentrum of luchthaven kan namelijk gebruik maken van contractuele voorwaarden in de huurovereenkomst met retailers, betreffende de toegang tot de site via SCC's en de kosten voor het gebruik ervan. Gelijkaardig is in het geval van een bouwproject de projectontwikkelaar verantwoordelijk voor zowel de financiering van het SCC als het realiseren van operationele en financiële voordelen. Deze voordelen kunnen bestaan uit kostenbesparingen op het project door bijvoorbeeld een snellere ontwikkeling van de locatie, minder afval en minder diefstal van bouwmaterialen. (Allen et al., 2012; Paddeu, 2017)

Voor SCC's die een stedelijk gebied geheel of gedeeltelijk bedienen, is de financiële situatie complexer. In deze gevallen is de beslissing om gebruik te maken van het SCC doorgaans vrijwillig en is er geen specifieke particuliere instantie die verantwoordelijk is voor de financiering van het SCC

of profiteert van de voordelen ervan. In plaats daarvan zijn er meestal meerdere zakelijke gebruikers, evenals een lokale overheid die de verkeers- en milieukosten wil verminderen. De SCC's van dit type lijken allemaal afhankelijk te zijn van de eerder genoemde overheidssubsidies, ondanks de promotie van diensten met toegevoegde waarde als onderdeel van het SCC-aanbod. De financiële lasten worden namelijk vaak ongelijk verdeeld tussen de verschillende partijen, waarbij de lokale overheid in veel gevallen een onevenredig grote rol speelt. Daarnaast vergen SCC's, zoals reeds aangegeven in de sectie over kosten (Sectie 2.2.3), een aanzienlijke investering in opstart- en exploitatiekosten. Voorbeelden wereldwijd tonen daarom aan dat de meeste SCC-pilots stopgezet worden zodra de overheidsfinanciering afloopt. Desondanks biedt dit type SCC het grootste potentieel om de negatieve effecten van het stedelijk goederenvervoer te verminderen, vooral vanwege de locatie in centrale stadsgebieden. (Allen et al., 2012; Johansson & Björklund, 2017; McKinnon et al., 2015; Paddeu, 2017; van Heeswijk et al., 2019)

Zonder enige initiële financiële steun van de centrale of lokale overheid voor haalbaarheidsstudies en pilots, is het onwaarschijnlijk dat SCC's zonder nieuwe ontwikkelingen kunnen blijven bestaan, laat staan succesvol zijn. Het realiseren van een hoge doorvoer bij een SCC zou door schaalvoordelen mogelijks kunnen resulteren in voldoende lage kosten, opdat zakelijke gebruikers de volledige SCC-operatie zelf kunnen financieren en daarmee de noodzaak van overheidssubsidie wegnemen. In het kader van bredere financiële overwegingen zou echter kunnen worden gepleit voor het gebruik van fondsen uit andere transport gerelateerde bronnen zoals congestieheffingen en rekeningrijden, om in SCC-activiteiten te investeren, met name wanneer het SCC aantoonbare voordelen biedt op het vlak van verkeer en milieu. (Allen et al., 2012; Björklund & Johansson, 2018; Johansson & Björklund, 2017; Paddeu, 2017; van Heeswijk et al., 2019)

Vanwege de ongelijk verdeelde financiële lasten is het tevens essentieel om speciale aandacht te besteden aan het maximaliseren van bijdragen van de particuliere sector. Dit zorgt ervoor dat degenen die profiteren van het SCC ook bijdragen aan de operationele kosten ervan (McKinnon et al., 2015). Een cruciale belemmering voor de financiële houdbaarheid van SCC's en dus voor het veiligstellen van hun toekomst op lange termijn, is in hoeverre de betrokken partijen (transporteurs, ontvangers en lokale overheden) bereid en in staat zijn om de financiële kosten van het SCC te dragen in ruil voor de voordelen die zij ontvangen. Hierdoor is, zoals in de sectie over kosten (Sectie 2.2.3) aangehaald, een belangrijke overweging hoe de kosten en baten die voortvloeien uit het volledige SCC-project moeten worden toegerekend. Momenteel wordt in veel SCC-regelingen de transporteurs die goederen aanleveren bij een SCC niet gevraagd om een bijdrage te leveren aan de exploitatiekosten. In plaats daarvan zijn het de ontvangers van de goederen die betalen voor de geleverde diensten. Het zijn echter de transporteurs die aanzienlijke voordelen ervaren in termen van tijdsbesparing, omdat ze niet hoeven te leveren in overbelaste stedelijke gebieden. Het ontwikkelen van een geschikt prijsmechanisme dat deze gebruikers laat bijdragen aan de operationele kosten van het SCC zal essentieel zijn voor het creëren van een duurzamer financieel model dat minder afhankelijk is van overheidssubsidies op de lange termijn. (Allen et al., 2012; Browne et al., 2005)

SCC's hebben tot slot een grotere kans om break-even te draaien als de deelname eraan verplicht kan worden gesteld via planningsovereenkomsten of huurcontracten. Echter, in de praktijk blijkt dit

momenteel in de meeste gevallen moeilijk te realiseren (McKinnon et al., 2015). Verplichte deelname aan SCC's werkt alleen als de organiserende instantie alle potentiële transporteurs en ontvangers effectief kan controleren of aanzienlijk beïnvloeden. Een andere mogelijkheid om dit te bewerkstelligen, door overheidsinterventie, is het opleggen van striktere toegangsbeperkingen voor voertuigen die niet zijn aangesloten bij het SCC. Hierdoor verkrijgt het SCC een competitief voordeel, wat kan helpen om de goederendoorvoer en daarmee de financiële levensvatbaarheid van SCC's te vergroten. In diverse recente SCC's die een deel of het geheel van een stedelijk gebied bedienen, hebben transportautoriteiten beperkingen opgelegd aan activiteiten van andere vrachtwagens om het gebruik van het SCC te stimuleren. Voorbeelden hiervan zijn onder meer de invoering van laadtijdbeperkingen in voetgangersgebieden die bediend worden door het SCC in Bristol, eisen in Parma dat vrachtwagens ten minste een Euro 3-motor moeten hebben, voor minstens 70% geladen moeten zijn en voorzien moeten zijn van een navigatiesysteem, een totaalverbod op vrachtwagens met een brutogewicht van meer dan 8,5 ton in Monaco en toegangsbeperkingen voor alle vrachtwagens in het historische centrum van Vicenza. (Allen et al., 2012)

### 2.2.5 Criteria voor succes

Ter afsluiting van dit onderdeel over de financiën van SCC's, worden op basis van de gepresenteerde informatie over opbrengsten, kosten en financiële levensvatbaarheid enkele overkoepelende criteria voor succes belicht. In het algemeen blijkt uit de literatuur en bevindingen dat SCC's het grootste potentieel op succes bieden wanneer ze voldoen aan één of meer van de volgende vijf criteria: beschikbaarheid van financiering, sterke betrokkenheid van de publieke sector, aanzienlijke bestaande problemen binnen het te bedienen gebied, "spontane" bottom-up druk van een groep potentiële gebruikers en het oplossen van logistieke problemen die verband houden met een site met één eigenaar. (Browne et al., 2005; Paddeu, 2018)

De beschikbaarheid van financiering blijft een cruciaal punt, vermits er nog geen sterke aanwijzingen zijn dat er volledig zelfvoorzienende regelingen bestaan. Aangezien een minimale doorvoer noodzakelijk is om de financiële levensvatbaarheid van deze regelingen te waarborgen, is externe steun voor SCC's in de opstartfase cruciaal. Dit kan komen in de vorm van overheidssubsidies of via externe investeerders. Tijdelijke subsidies aan transporteurs en het opleggen van toegangstoelagen voor specifieke gebieden zijn de meest effectieve maatregelen om een stabiele toestand te bereiken waarin het SCC winstgevend wordt en na het bereiken van een bepaalde schaalgrootte zonder externe financiering kan opereren. (Browne et al., 2005; Janjevic & Ndiaye, 2017; van Heeswijk et al., 2019)

Een sterke betrokkenheid van de publieke sector is van groot belang bij het stimuleren of afdwingen van het gebruik van SCC's via het regelgevend kader (Browne et al., 2005). Zoals eerder voorgesteld in de sectie over financiële levensvatbaarheid (Sectie 2.2.4), kan dit bijvoorbeeld door het instellen van tijdsbeperkingen voor toegang tot winkelgebieden in samenhang met openingstijden, hetgeen een effectieve maatregel is om betrokkenheid van ontvangers te creëren (van Heeswijk et al., 2019).

Aanzienlijke bestaande problemen in het te bedienen gebied zijn een bepalende factor. Denk hierbij aan gebieden met beperkte toegang voor voertuigen, ernstige verkeersopstoppingen en/of beperkte laad- en losmogelijkheden. Dit geldt met name voor historische stadscentra en wijken die kampen

met verkeersproblemen, waarbij het verbeteren van het straatbeeld een gemeenschappelijk doel is dat meer prioriteit heeft dan grootschalige stedelijke projecten. (Browne et al., 2005)

Een spontane, bottom-up, druk van een groep potentiële gebruikers die gemeenschappelijke belangen en doelstellingen heeft kan cruciaal zijn voor het succes van een SCC-initiatief. Dit kan zich manifesteren in een geografisch gebied waar handel wordt gedreven of waar een vergelijkbaar assortiment producten wordt verhandeld, maar waar geen nationale organisatie aanwezig is. Denk bijvoorbeeld aan een initiatief dat komt van een straatvereniging van retailers die de kwaliteit van hun winkelomgeving willen verbeteren door het vrachtverkeer naar hun locatie te reguleren. Een dergelijke groep zou het project aansturen door de medewerking van hun lokale overheid te eisen op het gebied van verkeersregulering en druk uit te oefenen op logistieke bedrijven om een verkeersminimalisatieplan te ontwikkelen, wat per definitie consolidatie omvat. Van Heeswijk et al. (2019) stelt daarentegen zoals vermeld in het onderdeel inkomsten (Sectie 2.2.2) dat de betrokkenheid van transporteurs bij het SCC eerst moet worden gewaarborgd voordat de ontvangers, zoals retailers, worden aangepakt. Volgens hen kan het SCC de hoogste inkomsten behalen door eerst transporteurs te overtuigen om hun leveringen uit te besteden en vervolgens diensten met toegevoegde waarde aan te bieden aan ontvangers in de stad. (Browne et al., 2005; van Heeswijk et al., 2019)

Het laatste criteria is het oplossen van logistieke problemen die verband houden met een locatie die wordt beheerd door één eigenaar of verhuurder, zoals een winkelcentrum. Dit geldt ook voor nieuwe en grote winkels of commerciële projecten, zowel binnen als buiten de stad, waar het mogelijk is om vanaf het begin en als integraal onderdeel van het totale ontwerp alle goederenontvangst en gerelateerde activiteiten te consolideren binnen een specifiek deel van het complex. Vanuit het perspectief van ontwikkelaars biedt dit ook de kans om de hoeveelheid beschikbare verhuurbare ruimte te maximaliseren. (Browne et al., 2005)

## 2.3 Diensten met toegevoegde waarde

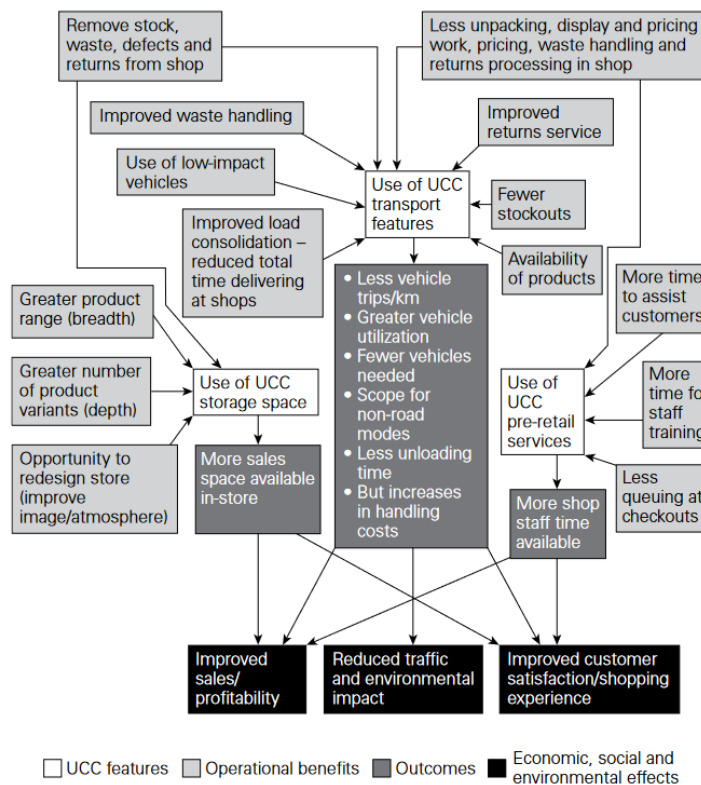
Naast het consolideren en sorteren van ladingen van logistieke bedrijven en hun aflevering, bieden verscheidene SCC's tegenwoordig een breed scala aan aanvullende logistieke en retail diensten met toegevoegde waarde. Zoals in de sectie financiën (Sectie 2.2) gebleken, is dit bedoeld om de efficiëntie van de toeleveringsketen te verbeteren en tegelijkertijd de aantrekkelijkheid en financiële prestaties van deze centra te verhogen. Het hebben van aanvullende diensten bij het SCC kan zowel de inkomsten verhogen als het algemene gebruik van het SCC, waardoor de rol ervan in het stedelijk gebied wordt versterkt. Hiermee kunnen bijgevolg de genoemde tekortkomingen bij het gedeelte kanttekening (Sectie 2.2.1) omtrent het gebrek aan toegevoegde waarde en financiële levensvatbaarheid mede worden weggewerkt. Diensten met toegevoegde waarde die een SCC kan bieden zijn bijvoorbeeld extra opslagcapaciteit, pre-retailactiviteiten, het afhandelen van retourlogistiek, thuisbezorging en de optimalisatie van bestelprocessen. De meeste van deze diensten zijn gericht op het vereenvoudigen van de logistieke activiteiten in de winkels van retailers. (Aastrup et al., 2012; Allen et al., 2012; Browne et al., 2005; Johansson & Björklund, 2017; van Rooijen & Quak, 2010)

De mogelijkheid om extra voorraadcapaciteit aan te wenden houdt in dat het SCC beschikt over opslagruimte die ontvangers kunnen huren. Hierdoor kan opslagruimte op de leveringslocatie worden vrijgemaakt voor andere, productievere of winstgevendere activiteiten, zoals verkooppruimten in de retail. Dit is met name gunstig wanneer de ruimte schaars is of uitbreiding wenselijk is. Bovendien, aangezien de huurkosten, die de waarde van het onroerend goed weerspiegelen, doorgaans veel hoger zijn in commerciële gebieden dan in industriële zones aan de rand van steden waar SCC's meestal gevestigd zijn (Lin et al., 2016), kan er aanzienlijk geld worden bespaard door opslagruimte te verplaatsen. Browne et al. (2005) voegen hieraan toe dat opslag bij SCC's ook als buffer kan fungeren tijdens seizoenspieken. (Browne et al., 2005; Johansson & Björklund, 2017)

Daarnaast kunnen SCC's diverse instore-diensten verlenen met betrekking tot pre-retailactiviteiten, waaronder het uitpakken van goederen, het aanbrengen van prijskaartjes en het bevestigen van antidiestallapparatuur. Ze kunnen ook een reeks andere activiteiten uitvoeren zoals het klaarmaken van producten voor presentatie, het samenstellen van promotionele aanbiedingen, het recyclen van afval, het bieden van een ophaalservice na verkoop voor de klanten van retailers en buitendienstwinkels voor servicemonteurs, waardoor deze taken niet meer in de winkel hoeven te worden uitgevoerd. Verder is retourlogistiek, inclusief het afhandelen van retourzendingen en het recyclen van verpakkingsmaterialen, een ander voorbeeld van een dienst met toegevoegde waarde die SCC's kunnen bieden. De omvang van deze in-store activiteiten mag niet worden onderschat. Uit een onderzoek van Saghir en Jönson (2001) van een van de grootste toeleveringsketens van de levensmiddelenhandel in Zweden bleek dat 75 procent van alle afhandelingsstijden in de winkelketen in de winkels zelf plaatsvond. Van Zelst et al. (2009) identificeerden bovendien dat de afhandelingskosten in de winkel de grootste kostenpost in de hele toeleveringsketen van de retailsector is. Daarenboven zou het personeel in de winkels, door gebruik te maken van een SCC, meer tijd kunnen besteden aan het helpen van klanten en zo een betere klantenservice bieden. (Allen et al., 2012; Browne et al., 2005; Johansson & Björklund, 2017)

Kortom, een winkel die wordt bediend door een SCC kan zich concentreren op zijn kerntaak: klantenservice bieden in de winkel. Voor de retailer zijn deze diensten met toegevoegde waarde dan ook de belangrijkste verdiensten van het SCC. In het onderzoek van Aastrup et al. (2012) naar de interesse van potentiële ontvangers in diensten met toegevoegde waarde, bleek dat de drie meest populaire diensten de bevestiging van antidiestallapparatuur, de toegang tot externe opslagcapaciteit en het retourneren van verpakkingsmaterialen waren. Interessant genoeg werd het voordeel van het kunnen retourneren van verpakkingsmaterialen twee keer zo groot ingeschat als de andere twee diensten samen. (Browne et al., 2005; Johansson & Björklund, 2017; van Heeswijk et al., 2019)

Samengevat illustreert Figuur 1 het scala aan logistieke en pre-retailactiviteiten die door een SCC kunnen worden uitgevoerd en de potentiële voordelen van deze activiteiten. (Browne et al., 2005; McKinnon et al., 2015)



*Figuur 1: Overzicht van potentiële logistieke en pre-retailactiviteiten bij SCC's en mogelijke voordelen (Browne et al., 2005; McKinnon et al., 2015)*

## 2.4 Stand van zaken literatuur

De literatuurstudie van Björklund et al. (2018) wijst op SCC's als een van de meest geïmplementeerde en onderzochte initiatieven binnen stadslogistiek. Hoewel onderzoek naar SCC's teruggaat tot de jaren 1970 en in toenemende mate in wetenschappelijke tijdschriften verschijnt, ontbreekt het aan een overzicht van literatuur specifiek gericht op deze oplossing. Vanaf het einde van de jaren 1990 en begin 2000 is er hernieuwde belangstelling voor het concept stedelijke consolidatiecentra, vooral in Europese landen zoals het Verenigd Koninkrijk, Frankrijk, Italië en Nederland (Browne et al., 2005). Het onderzoek naar SCC's kan worden omschreven als gefragmenteerd en heeft een interdisciplinaire focus op verschillende onderzoeksgebieden waaronder distributiestructuren, modellering, stakeholdermanagement en kosten-batenanalyses. Gezien de voortdurende groei van het onderzoeksveld, is het belangrijk om een overzicht te hebben van de huidige kennis. Dit is van belang omdat, zoals reeds besproken in het onderdeel financiën (Sectie 2.2), ondanks de potentiële voordelen van SCC-initiatieven de praktische implementatie ervan vaak mislukt. Dit wijst op hiaten in de literatuur, dewelke door Björklund et al. (2018) geïdentificeerd zijn, betreffende onder andere de economische aspecten van SCC's. (Allen et al., 2012; Björklund & Johansson, 2018; Browne et al., 2005; Iswari, 2023; Janjevic & Ndiaye, 2017)

Stedelijk goederenvervoer is van groot belang voor de stedelijke economie en levenskwaliteit, maar dit onderwerp kreeg tot voor kort opvallend weinig aandacht van onderzoekers en beleidsmakers op lokaal, regionaal, nationaal en internationaal niveau. De meeste studies die zijn uitgevoerd naar duurzaam stadsvervoer richten zich namelijk enkel op personenvervoer terwijl een algemeen erkende vereiste voor het bereiken van duurzaam stadsvervoer een geïntegreerde vervoersplanning is.

Vrachtovervoer wordt immers zelden expliciet besproken als onderdeel van deze integratie. Björklund et al. (2018) identificeerde in totaal 56 papers die tussen 2000 en 2017 zijn gepubliceerd en betrekking hebben op SCC's. Meer dan de helft van deze papers werd pas na 2014 gepubliceerd, wat de groeiende interesse in het onderzoek naar SCC's illustreert. Veel van deze studies over SCC's richten zich op specifieke casestudy's of situaties. Hoewel veel van deze studies waardevolle inzichten bieden in praktijksituaties, zijn de bevindingen niet altijd overdraagbaar naar andere contexten vanwege variaties in stedelijke kenmerken zoals bevolkingsdichtheid, regelgeving, vraagpatronen en infrastructuur. Dit benadrukt de noodzaak van een bredere scope en vergelijkende analyse binnen dit opkomende veld. (Björklund & Johansson, 2018; Iswari, 2023; McKinnon et al., 2015)

Bovendien belichten sommige studies variaties en verschillende perspectieven op specifieke aspecten van SCC's, zoals het type of de omvang van gebruikte voertuigen en hun effect. Janjevic en Ndiaye (2017) suggereren bijvoorbeeld dat grotere voertuigen de winstgevendheid van SCC's kunnen vergroten door de behoefte aan minder chauffeurs. Aan de andere kant benadrukken Elbert en Friedrich (2020) net de potentiële voordelen van bakfietsen en samenwerking tussen logistieke dienstverleners op het gebied van milieu en financiën. (Iswari, 2023)

Björklund et al. (2018) identificeerden vijf hoofdonderwerpen op basis van hun literatuurstudie naar SCC's. Deze omvatten de rol van stakeholders, het ontwerp van distributiestructuren en transportmiddelen, milieu- en sociale overwegingen en economische aspecten. Vaak ligt de nadruk op het vinden van "optimale" oplossingen en ontwerpen voor initiatieven, met weinig aandacht voor de financiële levensvatbaarheid of het beheer van SCC-initiatieven. Binnen de stakeholders, geïdentificeerd door Björklund et al. (2018), spelen lokale autoriteiten/overheid, ontvangers, logistieke dienstverleners, leveranciers en minder vaak genoemde stakeholders (zoals SCC-exploitanten, bewoners en onderzoeksinstituten) een belangrijke rol. Het ontwerp van distributiestructuren omvat zowel de plaatsbepaling van SCC's als de routeplanning en -optimalisatie. Op het gebied van milieu- en sociale overwegingen werden twee thema's geïdentificeerd waarbij duurzaamheid wordt beschouwd: als argument waarom acties moeten worden ondernomen en als verklaring voor hoe de implementatie van een SCC de duurzaamheid heeft beïnvloed. Ten slotte richten de economische overwegingen zich op hoe een SCC de economie beïnvloedt als kostendrijver en als middel om de kosten te verlagen, hoe SCC's schaalvoordelen mogelijk maken en wie de financieringsverantwoordelijkheid draagt voor het SCC. (Björklund & Johansson, 2018)

## 2.5 Onderzoekslacunes

Gebaseerd op beschikbare literatuur en bestaande literatuurstudies zijn er hiaten in het onderzoek naar voren gekomen die cruciaal zijn voor toekomstige onderzoeksagenda's en inzichten in praktische behoeften. Browne et al. (2005) benadrukt de noodzaak van verder onderzoek naar de totale kosten en baten in de supply chain, gerelateerd aan het gebruik van SCC's, inclusief de verkeers- en milieuvoordelen die momenteel niet in de prijsmechanismen worden weerspiegeld. Johansson en Björklund (2017) merkten op, in hun onderzoek naar de vraag van retailers naar SCC-diensten, dat er vaak een gebrek is aan perspectief vanuit de ontvangers van goederen. Ook is er weinig notie van de impact van SCC's op klantenservice en kosten in retailwinkels. (Björklund & Johansson, 2018; Browne et al., 2005; Johansson & Björklund, 2017)

Björklund et al. (2018) identificeerde en categoriseerde hiaten in het SCC-onderzoek op basis van de eerder genoemde vijf meest voorkomende onderwerpen. Allereerst bleken stakeholders, die een van de meest voor de hand liggende categorieën waren, in verschillende papers helemaal niet vermeld te worden. Bovendien werd in veel papers niet duidelijk op welke stakeholders de bestuurlijke of praktische implicaties gericht zijn, indien deze implicaties überhaupt al in overweging werden genomen. Dit gebrek aan vermelding en specificiteit kan worden beschouwd als een tekortkoming, omdat de meningen en zorgen van de betrokken belanghebbenden niet worden meegenomen. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat sommige onderzoekers geen echte cases bestuderen en als de SCC's niet fysiek bestaan, bestaan de exploitanten ervan ook niet. Toekomstig onderzoek zou daarom meer moeten focussen op hoe geïmpacteerde belanghebbenden beter kunnen worden betrokken bij dergelijke studies. (Björklund & Johansson, 2018)

Ten tweede is er een gebrek aan studies die een holistische benadering hanteren, waarbij alle economische, sociale en milieuaspecten met betrekking tot de locatiekeuze van het SCC worden meegenomen. Dit gebrek verhoogt het risico op sub-optimalisatie. Onderzoekers moeten een meer holistische aanpak aannemen, waarbij de impact op het gehele systeem wordt overwogen. Verder is er weinig aandacht besteed aan specifieke elementen die verband houden met voorraadbepalingen binnen SCC's, zoals de impact van de context waarin SCC's opereren op de prestaties, voorraadkosten en -beleid. Denk hierbij aan het aantal stedelijke retailers, het aantal leveranciers, de voorraadkosten en het voorraadbeleid dat door de retailers wordt toegepast. (Björklund & Johansson, 2018; Iswari, 2023)

Betreffende het onderwerp transportmiddelen merkte Browne et al. (2005) op dat de meest gemeten effecten veranderingen in voertuigrritten, -kilometers, -emissies en totaal brandstofverbruik zijn. Hoewel volgens Björklund et al. (2018) veel papers de verandering in gebruikte brandstof behandelden om milieu-uitdagingen aan te pakken, ontbrak diepgang in de uitdagingen van brandstofveranderingen zoals het ontwerp van elektrische netwerken voor stadsvoertuigen, de technologische impact op logistieke dienstverleners (bijvoorbeeld veranderingen in het onderhoud en het tanken van voertuigen) en de bronnen van opgewekte elektriciteit. Fietsen en spoorvervoer zijn de meest voorkomende alternatieve vervoerswijzen in de bestudeerde papers, maar deze zijn slechts oppervlakkig onderzocht in geïsoleerde tests en vereisen verder onderzoek naar hun potentiële rol in SCC-oplossingen. (Björklund & Johansson, 2018; Browne et al., 2005)

Wat betreft milieuoverwegingen besteden de bestudeerde artikelen zelden aandacht aan de triple-bottom-line (3BL) van planeet, mensen en winst. Deze lacune in het onderzoek is ook onderstreept door Browne et al. (2005) en Staricco en Brovarone (2016). Door de milieu- en sociale voordelen voor elke belanghebbende te benadrukken en hun effecten in termen van geldwaarde te berekenen, kunnen argumenten worden gegeven waarom ze integraal onderdeel zouden moeten zijn van een SCC-oplossing. Ook kunnen stakeholders hiermee overtuigd worden om deel uit te maken van een SCC-oplossing. Dit geldt met name voor de lokale overheden, die wellicht het meest kunnen profiteren van een aantrekkelijkere stad met minder vrachtvoertuigen. Slechts drie papers bespraken de milieu- of maatschappelijke effecten in termen van externe kosten. Het volledig onderzoeken van kosten en baten gerelateerd aan de triple-bottom-line is van essentieel belang om afwegingen en

synergiën tussen deze gebieden te begrijpen en verschillende SCC-initiatieven gemakkelijker te kunnen vergelijken. (Björklund & Johansson, 2018; Iswari, 2023)

Ten slotte, hoewel de economische aspecten van SCC's van cruciaal belang zijn voor hun levensvatbaarheid, zijn er slechts enkele papers die deze kwestie diepgaand behandelen. Er is behoefte aan onderzoek naar financiering, bedrijfsmodellen en schaalvoordelen binnen SCC's, aangezien deze onderwerpen vaak slechts in oppervlakkige, kwalitatieve, termen worden behandeld zonder drempelwaarden te onderzoeken. Het ontbreekt aan empirisch onderbouwde informatie over de levensvatbaarheid van SCC's, aangezien deze projecten te vaak gebaseerd zijn op intuïtie in plaats van een gekwantificeerde beoordeling (Browne et al., 2005). Weinig studies richten zich op een ex-post financiële evaluatie, de meeste papers voeren namelijk enkel een ex-ante financiële evaluatie uit voor specifieke projecten. Verder zijn schaalvoordelen, als gevolg van een voldoende hoge doorvoer van goederen, een belangrijk en veelgenoemd aspect gebleken in de sectie financiën (Sectie 2.2) om de financiële levensvatbaarheid van SCC's te vergroten. Desondanks wordt dit in de literatuur zelden in detail uitgelegd of berekend. Ten slotte is zoals eerder aangestipt in het onderdeel financiën (Sectie 2.2) een ander belangrijk aspect wie de kosten van het SCC moet dragen, aangezien economische levensvatbaarheid een belangrijke belemmering vormt voor het bereiken van een lange termijn stabiliteit. Aangezien SCC-diensten hierin een belangrijke rol spelen, was het opmerkelijk dat er maar weinig papers over deze diensten gingen en indien wel, zonder een diepgaande uitwerking. Dit wijst op een lacune in de literatuur, aangezien er weinig kennis te vinden is met betrekking tot mogelijke diensten en servicebehoeften. Deze kennislacunes vormen een uitdaging voor zowel de praktijk als onderzoekers. (Björklund & Johansson, 2018; Browne et al., 2005; Janjevic & Ndiaye, 2017; Paddeu, 2017; van Heeswijk et al., 2019)

## 2.6 Voor- en nadelen

Ter afsluiting en samenvatting van dit onderdeel over stedelijke consolidatiecentra (SCC's) worden op basis van de uitgebreide literatuurstudie van Browne et al. (2005) de belangrijkste voor- en nadelen van SCC's gepresenteerd. Deze komen ook in de voor deze masterproef geraadpleegde, recentere, literatuur naar voor en zijn dus nog steeds relevant en toepasbaar. Tabel 1 biedt een overzicht van de belangrijkste positieve en negatieve aspecten. Belangrijk is echter wel op te merken dat deze voor- en nadelen in veel gevallen niet worden ondersteund door bewijs, daarentegen vertegenwoordigen ze de voor- en nadelen waarnaar in de literatuur het vaakst wordt verwezen. (Browne et al., 2005; McKinnon et al., 2015)

Tabel 1 Belangrijkste voor- en nadelen van SCC's (Browne et al., 2005; McKinnon et al., 2015):

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Belangrijkste voordelen</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Milieu- en sociale voordelen als gevolg van efficiënter en minder ingrijpend transport binnen stedelijke gebieden.</li><li>• Betere planning en implementatie van logistieke operaties, met de mogelijkheid om nieuwe informatiesystemen te introduceren op hetzelfde moment als het consolidatiecentrum.</li><li>• Beter voorraadbeheer, productbeschikbaarheid en klantenservice.</li><li>• Kan een omschakeling van push- naar pull-logistiek vergemakkelijken door een betere controle en zichtbaarheid van de supply chain.</li></ul> |

- Potentieel om aan te sluiten bij bredere beleids- en regelgevingsinitiatieven.
- Theoretisch kostenvoordeel van het uitbesteden van 'last mile'.
- Public relations-voordelen voor deelnemers.
- Potentieel om een beter gebruik van middelen op leveringslocaties mogelijk te maken.
- Specifieke transportvoordelen.
- Mogelijkheid om diensten met toegevoegde waarde uit te voeren.

*Belangrijkste nadelen*

- Potentieel hoge opstartkosten en bij wijlen hoge werkingskosten.
- Moeilijk voor een enkel centrum om het brede scala aan goederen te kunnen verwerken die in en uit een stedelijk gebied worden verplaatst, bijvoorbeeld vanwege verschillende behandelings- en opslagvereisten.
- Kan leiden tot een stijging van de leveringskosten als gevolg van een extra goederenbehandelingsfase in de toeleveringsketen die een kosten- en vaak tijdsnadeel met zich meebrengt, hoewel dit duidelijk afhangt van hoe goed het centrum in de toeleveringsketen is geïntegreerd en de mate waarin alle kosten en baten in overweging worden genomen.
- Eén consolidatiecentrum voor een stedelijk gebied kan voor sommige leveranciersstromen onaantrekkelijk zijn vanwege de mate van omleiding van normale routes.
- Gebrek aan handhaving van de regelgeving voor voertuigen die niet in de consolidatieregeling zijn opgenomen.
- Verlies van de directe interface tussen leveranciers en klanten.

### 3 Twee-echelon netwerken

Het gebruik van een SCC leidt, zoals eerder besproken in de praktijkrelevantie (Sectie 1.1.3), tot de vorming van een distributienetwerk bestaande uit twee echelons. Het eerste echelon behandelt de leveringen aan SCC's gelegen aan de rand van stedelijke gebieden, meestal uitgevoerd door grote vrachtwagens, waar overslagactiviteiten plaatsvinden naar andere voertuigen evenals opslag-, samenvoegings- of consolidatieactiviteiten. Hierna volgt in het tweede echelon de distributie tussen SCC's en retailers met vaak kleinere, milieuvriendelijkere, voertuigen die geschikt zijn voor stadscentra. Het twee-echelon distributienetwerk behoort tot de categorie van wat doorgaans multi-echelon distributiesystemen worden genoemd, waarbij elk echelon verwijst naar één niveau van het netwerk. Dit type netwerken heeft in de stadslogistiek als doel om de goederenstroom binnen de stad te optimaliseren door de meest efficiënte routes, vervoersmodi en voorraadmiveaus over de verschillende echelons van het netwerk te bepalen. Multi-echelon netwerken in de stadslogistiek kunnen bijzonder uitdagend zijn vanwege de complexiteit van stedelijke omgevingen. Als gevolg hiervan zijn geavanceerde plannings- en optimalisatietechnieken essentieel om er de beste resultaten te behalen. Dit onderdeel verkent literatuur over routerings- en voorraadmodellen voor deze multi-echelon netwerken, specifiek voor twee-echelon netwerken. (Cattaruzza et al., 2017; Crainic et al., 2009; Cuda et al., 2015; Farias et al., 2021; Iswari, 2023)

#### 3.1 Twee-echelon voertuigrouteringsproblemen (2E-VRP)

Binnen het kader van twee-echelon netwerken moet de goederenstroom in het ene echelon afgestemd worden op die in het andere echelon. Bijgevolg kunnen vraagstukken betreffende de routing van voertuigen die zich voordoen in twee-echelon distributiesystemen niet simpelweg worden opgesplitst in twee subproblemen en vervolgens afzonderlijk worden opgelost. Deze voertuigrouteringsproblemen definiëren een klasse van combinatorische optimalisatieproblemen die het mogelijk maken om routes van een wagenpark te optimaliseren wanneer deze voertuigen rondritten rijden, met meerdere haltes langs hun route. Deze situatie vertegenwoordigt het merendeel van de voertuigstromen voor goederendistributie in stedelijke gebieden. Cuda et al. (2015) definieert routeringsproblemen met twee echelons als een klasse van problemen die onderzoeken hoe vracht optimaal kan worden gerouteerd in distributiesystemen met twee echelons, waarbij mogelijk ook locatiebeslissingen worden overwogen. Eerdere onderzoeken hebben aangetoond dat zulke optimalisaties van voertuigroutes aanzienlijke economische besparingen kunnen opleveren, geschat tussen 5 en 30 procent door Hasle en Kloster (2007) of tussen 5 en 20 procent door Toth en Vigo (2002). Het vervolg van deze sectie is als volgt gestructureerd: eerst wordt het doel van de twee-echelon voertuigrouteringsproblemen (2E-VRP) toegelicht, samen met enkele gemeenschappelijke assumpties. Daarna wordt de basisvariant en zijn werking gepresenteerd. Ten slotte wordt een stand van de literatuur over 2E-VRP's gegeven, inclusief enkele extensies van het basismodel. (Cattaruzza et al., 2017; Cuda et al., 2015; Iswari, 2023)

##### 3.1.1 Doel & assumpties

In de stadslogistiek vormt het "Two-echelon vehicle routing problem" (2E-VRP) een relevant en veel bestudeerd model waarmee de globale routes van een vloot voertuigen kunnen worden beheerd in situaties waarin een twee-echelon netwerk met SCC aanwezig is. Het 2E-VRP synchroniseert dan de

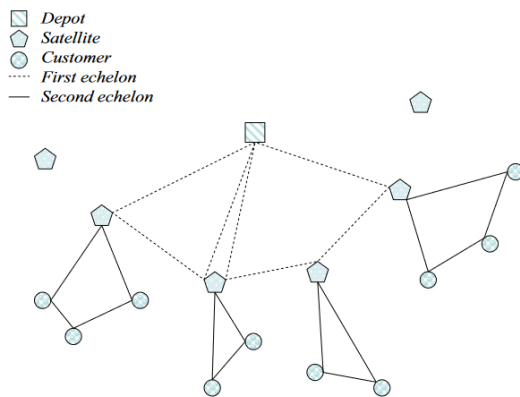
balans van de productstromen bij het SCC. Het doel van deze 2E-VRP's is om een reeks primaire (eerste echelon) en secundaire (tweede echelon) routes te vinden die voldoen aan de vraag van de retailers, terwijl de kosten van transport en goederenbehandeling worden geminimaliseerd. (Cattaruzza et al., 2017; Crainic et al., 2010; Cuda et al., 2015; Farias et al., 2021; Hemmelmayr et al., 2012)

Gemeenschappelijke assumpties in de klassieke versie van het 2E-VRP omvatten de volgende aspecten (Cattaruzza et al., 2017; Crainic et al., 2010; Cuda et al., 2015; Hemmelmayr et al., 2012):

1. Voor iedere klant is er een gegeven vraag die moet worden vervuld door één leverancier (depot), die verplicht is om gebruik te maken van een set SCC's.
2. In het distributienetwerk wordt het goederenvervoer uitgevoerd door twee verschillende wagenparken, één op elk echelon. Voertuigen van het eerste echelon worden geclassificeerd als primaire voertuigen, terwijl voertuigen van het tweede echelon secundaire voertuigen worden genoemd. Een wagenpark van grotere primaire voertuigen is gevestigd bij de leverancier, terwijl een beperkt aantal kleinere secundaire voertuigen wordt gedeeld door de SCC's. Zowel de primaire als de secundaire voertuigen hebben een beperkte capaciteit en zijn homogeen binnen hun respectievelijke echelons.
3. Primaire voertuigroutes bevoorraden de set van SCC's, waarbij capaciteitsbeperkingen gelden die de opslagcapaciteit van het SCC vertegenwoordigen en het maximale aantal secundaire voertuigen dat er doorheen kan worden geleid. Elk SCC kan worden bediend door één of meerdere primaire voertuigen. Elk primair voertuig kan de vracht van een of meer klanten afleveren en kan dus ook meer dan één SCC op dezelfde route bedienen. Omgekeerd wordt elke klant bediend door precies één secundair voertuig in één enkele rondrit rond een SCC voor elk voertuig, wat betekent dat gesplitste leveringen niet toegestaan zijn op het tweede echelon.
4. Elk SCC is gekoppeld aan goederenbehandelingskosten die worden betaald voor laad- en loswerkzaamheden.

### 3.1.2 Werking: 2E-CVRP

Een van de meest onderzochte en eenvoudigste varianten van een 2E-VRP is het "Capacitated 2E-VRP" (2E-CVRP). In een 2E-CVRP zijn er op specifieke locaties één leverancier, een set SCC's en een set klanten beschikbaar. Het doel van een 2E-CVRP is, zoals eerder vermeld, het vinden van een reeks routes op beide niveaus zodat wordt voldaan aan de vraag van alle retailers, terwijl tegelijkertijd de capaciteitsbeperkingen van SCC's en voertuigen niet worden geschonden. Hierbij dienen tegelijkertijd de totale distributiekosten te worden geminimaliseerd. Deze totale kosten bestaan uit twee componenten: de kosten van de gebruikte primaire en secundaire routes en de verwerkingskosten bij de SCC's. Daarnaast moet de totale vracht die aan een SCC wordt geleverd, gelijk zijn aan de totale vraag van de klanten die vanuit dat SCC worden bediend (ladingssynchronisatie). In Figuur 2, waar *Satellite* gelijk is aan een SCC, wordt een uitvoerbare oplossing geïllustreerd voor een 2E-CVRP. (Crainic et al., 2010; Cuda et al., 2015; Sluijk et al., 2023)



*Figuur 2: Voorbeeld van een uitvoerbare oplossing voor een 2E-CVRP (Cuda et al., 2015)*

De exacte methoden om het 2E-CVRP op te lossen zijn voornamelijk gebaseerd op exacte branch-and-cut algoritmen, die bestaan uit een combinatie van drie soorten technieken: automatische probleemvoorbewerking, het genereren van cutting planes en slimme branch-and-bound algoritmes. Automatische probleemvoorbewerking omvat een computerinspectie van de formulering van het lineaire programmeerprobleem om herformuleringen te ontdekken die het probleem sneller oplossen zonder haalbare oplossingen te elimineren. Cutting planes zijn nieuwe functionele beperkingen die het haalbare gebied voor de lineaire programmering verkleinen zonder haalbare oplossingen uit te sluiten, wat de prestaties van het branch-and-bound algoritme verbetert en versnelt. Het basisconcept achter die branch-and-bound techniek is verdeel en heers, waarbij het oorspronkelijke probleem wordt opgedeeld in kleinere deelproblemen die vervolgens worden opgelost. Dit proces omvat het verdelen van de gehele set haalbare oplossingen in subsets en het begrenzen van de best mogelijke oplossingen in elke subset. Indien deze begrenzing aangeeft dat deze onmogelijk een optimale oplossing voor het oorspronkelijke probleem kan bevatten worden ze geëlimineerd. De branch-and-cut benadering combineert het genereren van verscheidene cutting planes met branch-and-bound technieken, waardoor een krachtige algoritmische aanpak ontstaat voor het oplossen van problemen. (Farias et al., 2021; Hillier & Lieberman, 2010)

Het oplossen van middelgrote 2E-VRP-instanties (tot 75 klanten) met behulp van verschillende exacte algoritmen is echter al een rekenkundige uitdaging. In de praktijk kunnen de instanties zelfs veel groter zijn. Voor deze gevallen moeten benaderende methoden worden gebruikt die binnen een redelijke tijd goede oplossingen genereren. Om deze reden zijn heuristieken ontwikkeld die de optimale oplossing proberen te benaderen, waaronder variable neighborhood descent, variable neighborhood search, tabu search, (adaptive) large neighborhood search, genetic en path relinking algoritmes. De best presterende heuristieken voor het 2E-VRP met één leverancier zijn die benaderingen gebaseerd op neighborhood search. Momenteel is er echter geen enkele heuristiek die beter presteert dan al de anderen. (Farias et al., 2021; Sluijk et al., 2023)

In het licht van deze masterproef zullen niet al deze verschillende heuristische methoden in detail worden behandeld, wel zal de algemene werking ervan worden besproken. Alle heuristieken vereisen namelijk een initiële oplossing om te verbeteren en een gemeenschappelijk patroon in alle 2E-VRP-heuristieken is om een initiële oplossing te genereren door het 2E-VRP op te splitsen in twee afzonderlijke subproblemen, één voor elk echelon. In eerste instantie wordt het VRP opgelost dat

verband houdt met het subprobleem op het tweede echelon. Nadat het routeringsprobleem van het tweede echelon is opgelost, wordt de vraag van elk SCC berekend als de totale vraag van de klanten die worden bediend door alle routes op het tweede echelon die vanaf dat SCC vertrekken. Vervolgens worden de routes op het eerste echelon opgesteld met behulp van doorgaans exacte methoden, gezien het relatief kleine aantal leveranciers en SCC's in de meeste gevallen. Op deze manier wordt een haalbare initiële oplossing gegenereerd voor beide echelons. (Sluijk et al., 2023)

Vervolgens wordt meestal een local search opgenomen in heuristieken om de zoektocht naar veelbelovende oplossingen te intensiveren. Het vertrekt vanuit een kandidaat-oplossing en evalueert iteratief buuroplossingen, die worden verkregen door bijvoorbeeld een klant te verplaatsen naar een andere positie binnen een route. Bijna alle papers rond dit onderwerp hanteren een first-improvement beleid, waarbij de eerste verbeterende oplossing wordt geaccepteerd als de volgende kandidaat-oplossing. Afhankelijk van het beleid wordt dan de eerste verbetering of de best verbeterende oplossing in de buurt gekozen als de nieuwe oplossing. Deze zoektocht gaat door totdat geen van de burens een nieuwe oplossing produceert, wat betekent dat een lokaal optimum is gevonden. (Hemmelmayr et al., 2012; Sluijk et al., 2023)

### 3.1.3 Stand van literatuur & extensies

In de afgelopen jaren is een aanzienlijk aantal papers gepubliceerd die zich richten op routeringsproblemen met twee echelons. Een recente literatuurstudie uit 2023, uitgevoerd door Sluijk et al. (2023), bracht structuur en overzicht in alle literatuur rond het 2E-VRP. Ze constateerden dat het vroegere werk vooral gericht is op de basisvariant van het 2E-VRP met één leverancier en dat de literatuur over het 2E-VRP de afgelopen jaren aanzienlijk uitgebreid is. Meer dan 60 papers zijn tot op heden gepubliceerd in wetenschappelijke tijdschriften, waarmee zowel de academische als praktische relevantie van 2E-VRP's wordt benadrukt. Deze papers variëren van varianten van het basisprobleem tot verschillende oplossingsmethoden ervan. 2E-VRP's kunnen worden ingedeeld op basis van het soort beslissingen dat erbij betrokken is. Dit kunnen strategische planningsbeslissingen zijn, betreffende de infrastructuur van het netwerk inclusief het aantal en de locaties van faciliteiten, of tactische planningsbeslissingen. In deze masterproef wordt de focus gelegd op de tactische planningsbeslissingen, met name de routing van vracht door het netwerk en de toewijzing van klanten aan intermediaire faciliteiten (SCC's). (Cuda et al., 2015; Farias et al., 2021; Sluijk et al., 2023)

Voordat het literatuuronderzoek van Sluijk et al. (2023) gepubliceerd werd, was het onderzoek van Cuda et al. (2015) de meest recente literatuurstudie over het 2E-VRP. Hierin werden naast het 2E-VRP nog twee andere klassen van gerelateerde problemen opgenomen: het twee-echelon locatie-routing probleem en het truck-en-trailer routing probleem. Deze varianten zullen in deze masterproef niet verder uitgewerkt worden. Cuda et al. (2015) toonde net als Sluijk et al. (2023) aan dat het grootste deel van het bestaande onderzoek naar 2E-VRP's zich concentreert op de basisversie, het 2E-CVRP. Ze waren zich bewust van slechts één artikel, namelijk Crainic et al. (2009), dat een variant van het 2E-CVRP bestudeert met verschillende aanvullende kenmerken. Daarnaast vergeleken sommige onderzoekers ook de effectiviteit van een leveringsstrategie die een 2E-CVRP implementeert met een single-echelon-strategie die een CVRP hanteert. Crainic et al. (2010) onderzochten de impact van wijzigingen in instanties, zoals het aantal en de locatie van de

consolidatiecentra en klanten, op de totale distributiekosten. Dezelfde auteurs onderzochten in 2012 (Crainic et al., 2012) hoe het opnemen van andere componenten dan de afstand (zoals vaste kosten voor het gebruik van een verbinding, operationele- en milieukosten) in de reiskosten van invloed is op de optimale oplossing. Beide studies suggereerden dat de algehele prestaties van een leveringsstrategie die een 2E-CVRP hanteert beter zijn dan die van een CVRP. (Cuda et al., 2015; Sluijk et al., 2023)

Sinds de literatuurstudie van Cuda et al. (2015) is de hoeveelheid gepubliceerd onderzoek opvallend toegenomen, met meer dan 40 papers alleen al over het 2E-VRP. Daarnaast zijn er in de loop der jaren talloze unieke en vaak complexere varianten van 2E-VRP in de literatuur gepubliceerd. Deze varianten bevatten aspecten die worden aangetroffen in praktijktoepassingen van voertuigrouting en zijn ontstaan uit de noodzaak om de continue en dynamische ontwikkeling van steden in modellen op te nemen (Cattaruzza et al., 2017). Zoals eerder besproken zijn voor het 2E-VRP en zijn varianten tevens een groot aantal zowel exacte als heuristische methoden ontwikkeld. Enkele van de belangrijkste variaties op het 2E-VRP zullen nu nader besproken worden. (Cuda et al., 2015; Sluijk et al., 2023)

Een veelvoorkomende uitbreiding van het traditionele 2E-VRP-probleem is het gebruik van meerdere depots en dus leveranciers, waarbij elk depot doorgaans zijn eigen set primaire voertuigen heeft. Indien het probleem ook meerdere soorten goederen omvat, kunnen vanuit deze depots één of meerdere types goederen worden aangevoerd. (Cuda et al., 2015; Dellaert et al., 2021; Gu et al., 2022; Sluijk et al., 2023)

Daarnaast, om de implementatie van een distributiesysteem met twee echelons eenvoudiger mogelijk te maken met minimale wijzigingen in de bestaande netwerkinfrastructuur, wordt vaak aangenomen dat consolidatiecentra geen opslagcapaciteit hebben. Hierdoor kunnen bestaande locaties zoals voertuigdepots worden gebruikt als consolidatielocaties. De fysieke ruimte op dergelijke locaties kan echter beperkt zijn of alleen toegankelijk tijdens bepaalde uren van de dag, waardoor het aantal primaire en secundaire voertuigen dat een consolidatiecentrum kan bereiken wordt beperkt. (Sluijk et al., 2023)

Hoewel de meeste werken uitgaan van homogene voertuigen voor het eerste en tweede echelon, wordt in een beperkt aantal publicaties ook rekening gehouden met heterogene voertuigen, zoals voertuigen met verschillende capaciteiten. Zo wordt in sommige publicaties uitgegaan van specifieke soorten voertuigen, zoals bakfietsen en elektrische voertuigen. Elektrische voertuigen brengen echter extra uitdagingen met zich mee, omdat deze doorgaans actieradius- en capaciteitsbeperkingen hebben. (Agárdi et al., 2019; Bevilacqua et al., 2019; Sluijk et al., 2023)

Ten slotte merkten Braekers, Ramaekers en Van Nieuwenhuyse (2016) op dat bijna 40 procent van de literatuur over het VRP met één echelon tijdvensters bevat. Daarom is een evidente uitbreiding voor het 2E-VRP het opnemen van tijdvensters (2E-VRPTW). In de meeste papers die dit toepassen op het 2E-VRP wordt aan elke klant dan één hard tijdvenster gekoppeld om de vroegste en laatste servicetijden op te geven. Waar de harde tijdvensters de absoluut vroegste en laatst mogelijke servicetijden definiëren, definieert een zacht tijdvenster de gewenste servicetijden binnen die harde tijdvensters. Er worden dan boetekosten in rekening gebracht wanneer een klant buiten het zachte

tijdvenster wordt bediend. Deze tijdvensters bij klanten brengen extra algoritmische uitdagingen met zich mee, bijvoorbeeld doordat ze deadlines opleggen voor het vroegst en laatst mogelijke vertrek van secundaire voertuigen van de SCC's en bijgevolg voor aankomst- en vertrektijden van primaire voertuigen bij respectievelijk de SCC's en depots. (Braekers et al., 2016; Cuda et al., 2015; Sluijk et al., 2023)

Het is belangrijk op te merken dat het onderzoek naar veel van deze complexe varianten met betrekking tot realistische kenmerken in stadsvervoer nog in de beginfase verkeert. Ook nemen veel van deze studies het voorraadaspect niet mee in het VRP-model, wat een belangrijke focus voor toekomstig onderzoek kan zijn. Sluijk et al. (2023) benadrukken naast de verdere ontwikkeling van de verschillende varianten voor stadsvervoer en de integratie van voorraadaspecten bij de consolidatiecentra ook synchronisatieproblemen, meerdere ritten op het tweede echelon en onzekerheid als mogelijke toekomstige onderzoeksrichtingen voor het 2E-VRP. (Cuda et al., 2015; Farias et al., 2021; Iswari, 2023; Sluijk et al., 2023)

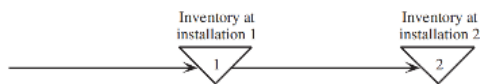
## 3.2 Twee-echelon voorraadsystemen

Een andere onderzoeksrichting binnen de modellering van twee-echelon netwerken betreft het beheer van voorraadniveaus over de verschillende echelons heen met behulp van modellen. Een dergelijk systeem, dat rekening houdt met meerdere echelons van voorraad, wordt een multi-echelon voorraadsysteem genoemd. Deze systemen zijn gangbaar in toeleveringsketens, zowel in de distributie als in de productie. In de distributie bijvoorbeeld, maken veel bedrijven gebruik van een voorraadsysteem met een centraal magazijn nabij de productiefaciliteit en meerdere lokale voorraadpunten in verschillende gebieden dicht bij de klanten, om producten over grote geografische gebieden te distribueren. Op een vergelijkbare manier worden in de productie voorraden van grondstoffen, componenten en eindproducten aan elkaar gekoppeld. Het onderzoek rond dit thema richt zich niet specifiek op stadslogistiek, maar eerder op de vaak wereldwijd verspreide voorraadketens van fabrikanten in de geglobaliseerde economie. Desalniettemin kan dit een interessant model zijn voor de stadslogistiek, in het bijzonder voor netwerken met SCC's, doordat voorraadbeheer er een cruciale rol speelt. Het heeft een directe impact op de efficiëntie, kostenbeheersing en duurzaamheid van stedelijke toeleveringsketens. Bovendien, zoals eerder uiteengezet in het gedeelte over SCC's (Sectie 2.3), is een mogelijke dienst die de SCC's kunnen aanbieden extra opslagcapaciteit, hetgeen dit model voor voorraadbeheer mee kan faciliteren. (Axsäter, 2003, 2006; Farias et al., 2021; Hillier & Lieberman, 2010; Iswari, 2023)

### 3.2.1 Doel & assumpties

Het beheer van multi-echelon voorraadsystemen is een cruciaal onderdeel van supply chain-activiteiten. Er is namelijk enige coördinatie nodig tussen de voorraden van een bepaald product op de verschillende echelons. Aangezien de voorraad op elk echelon, behalve het laatste, wordt gebruikt om de voorraad op het volgende echelon aan te vullen wanneer nodig, wordt het voorraadniveau dat momenteel nodig is op een echelon beïnvloed door hoe snel aanvulling nodig zal zijn op de verschillende locaties voor het volgende echelon. In een netwerk met twee echelons wordt de voorraad bij het SCC dus gebruikt om de voorraad bij de klant periodiek aan te vullen. Hoge voorraadniveaus verhogen het reactievermogen van de toeleveringsketen, maar verlagen de kostenefficiëntie vanwege de kosten voor het aanhouden van voorraad. Daarom is het gebruikelijke

doel van een deterministisch multi-echelon voorraadmodel het coördineren van de voorraden op de verschillende echelons om de totale kosten van het gehele multi-echelon voorraadstelsel te minimaliseren en tegelijkertijd aan de vraag te voldoen. De analyse van dergelijke multi-echelon voorraadsystemen is een grote uitdaging. Ondanks het feit dat het al sinds het midden van de jaren 1950 bestaat, zijn multi-echelon voorraadsystemen nog steeds een zeer actief onderzoeksgebied. Naast het gegroeide belang van multi-echelon voorraadsystemen binnen supply chain management doorheen de tijd, zijn de complexiteit en praktische relevantie ervan belangrijke verklaringen voor deze activiteit, aangezien er geen pakketoplossingen bestaan. (Axsäter, 2003; de Kok et al., 2018; Hillier & Lieberman, 2010; Mendoza & Ventura, 2010)



*Figuur 3: Serieel twee-echelon netwerk (Hillier & Lieberman, 2010)*

Gegeven een twee-echelon netwerk, zoals geïllustreerd in Figuur 3 met twee installaties, waarin er in het licht van deze masterproef één SCC en één klant verondersteld worden, maken Hillier en Lieberman (2010) de volgende assumpties voor een basissysteem waarop een serieel twee-echelon voorraadmodel kan worden toegepast (Hillier & Lieberman, 2010):

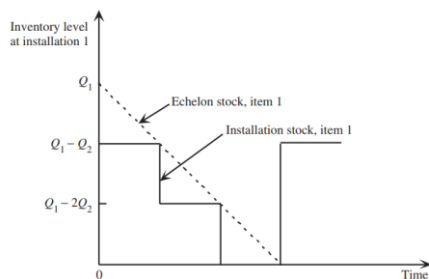
1. Bij de klant gelden de standaardassumpties van een Economic Order Quantity model. Dit betekent dat er een gekende constante vraag is van  $d$  eenheden per tijdseenheid, dat een bestelhoeveelheid van  $Q_2$  eenheden op tijd wordt geplaatst om de voorraad aan te vullen wanneer deze op nul komt en dat geplande tekorten niet zijn toegestaan.
2. De relevante kosten bij de klant zijn een setup-kost van  $K_2$  telkens een order wordt geplaatst en een bewaarkost van  $H_2$  per eenheid per tijdseenheid.
3. Het SCC gebruikt zijn voorraad om telkens wanneer er een bestelling binnenkomt, onmiddellijk een batch van  $Q_2$  eenheden te leveren aan de klant.
4. Er wordt op tijd een bestelhoeveelheid van  $Q_1$  eenheden geplaatst om de voorraad van het SCC aan te vullen voordat er een tekort zou ontstaan.
5. Net als bij de klant zijn de relevante kosten bij het SCC een setup-kost van  $K_1$  telkens een order wordt geplaatst en een bewaarkost van  $H_1$  per eenheid per tijdseenheid.
6. De eenheden stijgen in waarde wanneer ze door de klant worden ontvangen en verwerkt, dus  $H_1 < H_2$ .
7. Het doel is om de som van de variabele kosten per tijdseenheid in de twee instanties te minimaliseren. (Dit wordt aangeduid met  $C$ .)

### 3.2.2 Werking

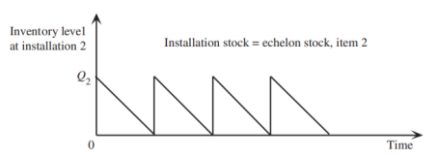
Het vervolg van dit onderdeel zal een dieper inzicht bieden in de basiswerking en de overwegingen achter het serieel twee-echelon model, gebaseerd op de bovengenoemde assumpties.

In assumptie 3 impliceert het woord "onmiddellijk" dat er geen doorlooptijd is tussen het moment waarop de klant een bestelling plaatst voor  $Q_2$  eenheden en het moment waarop het SCC die bestelling uitvoert. In de realiteit zou er echter een aanzienlijke doorlooptijd zijn vanwege de tijd die het SCC nodig heeft om de bestelling te ontvangen, verwerken en vervolgens de partij naar de klant

te vervoeren. Niettemin, zolang de doorlooptijd vaststaat, is het gebruik van een doorlooptijd van nul voor modelleringsdoeleinden equivalent aan het net op tijd plaatsen van de bestelling om de batch te laten aankomen wanneer het voorraadniveau tot nul zakt. (Hillier & Lieberman, 2010)



*Figuur 4: Evolutie voorraadniveau bij SCC (Hillier & Lieberman, 2010)*



*Figuur 5: Evolutie voorraadniveau bij klant (Hillier & Lieberman, 2010)*

Hoewel een doorlooptijd van nul en een vaste doorlooptijd gelijkwaardig zijn voor modelleringsdoeleinden, vereenvoudigt het aannemen van een doorlooptijd van nul de conceptualisering van hoe de voorraadniveaus bij de twee installaties (SCC & klant) gelijktijdig variëren in de tijd. Figuren 4 en 5 illustreren deze conceptualisering. Onder de assumpties van het basis EOQ-model variëren de voorraadniveaus bij de klant volgens een zaagtandpatroon. Telkens wanneer de klant zijn inventaris moet aanvullen, verzendt het SCC  $Q_2$  eenheden naar de klant. De voorraad bij de klant raakt dan uitgeput met de constante vraagsnelheid van  $d$  eenheden per tijdseenheid tot de volgende aanvulling, die plaatsvindt zodra het voorraadniveau tot 0 daalt. (Hillier & Lieberman, 2010)

Het patroon van voorraadniveaus in de loop der tijd voor het SCC is complexer dan voor de klant. Telkens wanneer de klant  $Q_2$  eenheden nodig heeft om zijn voorraad aan te vullen, moeten er  $Q_2$  eenheden uit de inventaris van het SCC worden gehaald om de klant te bevoorraden. Dit betekent dat de voorraad van het SCC periodiek moet worden aangevuld door een bestelling van  $Q_1$  eenheden te plaatsen. De deterministische aard van het model impliceert dat het SCC zijn voorraad alleen moet aanvullen op het moment dat zijn voorraadniveau nul is en er tegelijkertijd een onttrekking aan de inventaris moet gebeuren om de klant te bevoorraden. Bijgevolg, telkens wanneer het SCC een batch van  $Q_1$  eenheden ontvangt, levert hij gelijktijdig een batch van  $Q_2$  eenheden aan de klant waardoor de nog beschikbare voorraad (de installatievoorraad genoemd) bij het SCC  $(Q_1 - Q_2)$  eenheden is. Als de aanvulling later zou zijn, kan het SCC de klant niet tijdig bevoorraden om daar het optimale voorraadbeleid te blijven volgen, wat onaanvaardbaar is. Als de aanvulling eerder zou zijn, zouden er extra kosten zijn om de voorraad vast te houden bij het SCC, wat minder efficiënt is. Dit leidt tot het volgende inzicht: Een optimaal beleid moet  $Q_1 = nQ_2$  hebben, waarbij  $n$  een vast positief geheel getal is. Bovendien moet het SCC alleen zijn voorraad aanvullen met een partij van  $Q_1$  eenheden

wanneer het voorraadniveau nul is en het tijd is om de klant een partij van  $Q_2$  eenheden te leveren. (Hillier & Lieberman, 2010)

In een multi-echelon voorraadstelsel bestaat de echelonvoorraad van een bepaald item in een installatie (SCC, klant, ...) uit de fysieke voorraad van dat item in die installatie, de installatievoorraad, plus de voorraad van hetzelfde item die zich al verder stroomafwaarts bevindt in volgende echelons van het stelsel. Aangezien de voorraad van het SCC periodiek naar de klant wordt verzonden, is de echelonvoorraad daar de som van de installatievoorraad bij het SCC en het voorraadniveau bij de klant. Op tijdstip 0 is de echelonvoorraad bij het SCC  $Q_1$  omdat  $(Q_1 - Q_2)$  eenheden beschikbaar blijven en  $Q_2$  eenheden net naar de klant zijn verzonden om de voorraad daar aan te vullen. Naarmate de constante vraag bij de klant de voorraad daar vermindert, daalt de echelonvoorraad op het SCC met dezelfde constante snelheid totdat de volgende zending van  $Q_1$  eenheden daar wordt ontvangen. Bijgevolg, als de echelonvoorraad bij het SCC over een langere periode zou worden geanalyseerd dan weergegeven in Figuur 4, zou hetzelfde zaagtandpatroon van voorraadniveaus zichtbaar zijn. Echelonvoorraad speelt een fundamentele rol in de analyse van multi-echelon voorraadstelsels, omdat het zaagtandpatroon van voorraadniveaus voor echelonvoorraad het mogelijk maakt om een analyse te gebruiken die vergelijkbaar is met die voor het basismodel van EOQ. (Hillier & Lieberman, 2010)

Om de totale variabele kosten per eenheid bij zowel de klant als het SCC te minimaliseren, zou de meest eenvoudige aanpak zijn om afzonderlijk de waarden van  $Q_2$  en  $Q_1 = nQ_2$  te zoeken. Deze benadering gaat echter voorbij aan het verband tussen de variabele kosten bij beide installaties (SCC & klant). Omdat de batchgrootte  $Q_2$  de voorraadniveaus van het SCC beïnvloedt, zal het apart optimaliseren van  $Q_2$  zonder met de gevolgen rekening te houden niet leiden tot een algeheel optimale oplossing en zorgen voor mogelijks aanzienlijke afwijkingen. De enige geldige benadering is daarom om de kosten van beide installaties (SCC & klant) gelijktijdig in overweging te nemen, wat leidt tot de volgende vergelijking om te minimaliseren (Hillier & Lieberman, 2010):

$$C = C_1 + C_2 = \left( \frac{K_1}{n} + K_2 \right) \frac{d}{Q_2} + [(n-1)h_1 + h_2] \frac{Q_2}{2}$$

Een belangrijke kanttekening die gemaakt moet worden voor dit type voorraadmodel is de beperkte toepasbaarheid ervan op het scenario van een SCC met meerdere retailers als klanten. Het model is namelijk specifiek ontwikkeld voor een serieel echelonnetwerk, waarin elk echelon hoogstens één voorganger en één opvolger heeft, in tegenstelling tot een gebruikelijk distributiesysteem met een centraal magazijn (SCC) en een aantal retailers in de stadslogistiek. Desalniettemin kan het model worden gebruikt als een vereenvoudigde voorstelling om de voordelen te illustreren die kunnen worden behaald door de gezamenlijke coördinatie van voorraden. In het algehele onderzoeksdomein rond multi-echelon voorraadmodellen zijn de besparingen die worden gerealiseerd door vaak complexere modellen met stochastische vraag meestal aanzienlijk voor de gerapporteerde toepassingen. Dergelijke toepassingen omvatten doorgaans grootschalige bedrijfstransformatie- en organisatorische veranderingsprojecten. Echter, omdat dergelijke projecten niet frequent voorkomen, kan dit een reden zijn voor het relatief kleine aantal gepubliceerde veldstudies. Het is zeer waarschijnlijk dat de toepassing van de resultaten van supply chain- en voorraadonderzoek in de praktijk veel vaker voorkomt dan wat de beperkte gevallen die in de literatuur worden

gerapporteerd suggereren, mogelijk vanwege vertrouwelijkheid of andere beperkingen. (Axsäter, 2003; de Kok et al., 2018)

## 4 IRP

### 4.1 VMI & definitie

De voorgaande sectie betreffende twee-echelon netwerken, bestaande uit routerings- en voorraadmodellen, vormt de basis voor dit onderdeel betreffende het “inventory-routing problem” (IRP), hetgeen vergelijkbaar is met een combinatie van beide modeltypes voor één- en recent ook twee-echelon distributiesystemen. De studie naar het IRP is geworteld in het onderzoek van Bell et al. (1983), dat 40 jaar geleden werd gepubliceerd. Het ontstaat in de context van “Vendor Managed Inventory (VMI)”, dat hierna zal worden toegelicht. Het IRP is in de basis ontwikkeld als model voor een situatie met één echelon, recent zijn er echter varianten ontwikkeld voor toepassing binnen twee-echelon netwerken, zoals bij een SCC. Daarom zal na de uitleg over VMI eerst het originele IRP model geïntroduceerd worden samen met diverse criteria op basis van dewelke deze modellen en verschillende extensies ervan geclassificeerd kunnen worden. Hierna zullen verscheidene oplossingsmethodes en ten slotte de twee-echelon uitbreiding besproken worden. (L. C. Coelho et al., 2014; Iswari, 2023)

Zoals eerder al aangehaald in de inleiding, kunnen logistieke actoren profiteren van samenwerkingsverbanden met een nadruk op coördinatie en integratie in een supply chain. Op die manier kunnen ze voordelen behalen in de concurrentie tussen supply chains. Moderne supply chains vereisen namelijk een hoge mate van coördinatie en synchronisatie van hun beslissingen, wat kan helpen de logistieke kosten te verlagen en de relatie tussen leverancier en klant te verbeteren. De twee belangrijkste vormen van samenwerking in de toeleveringsketen zijn horizontale en verticale samenwerking. Horizontale samenwerking vindt plaats tussen actoren op hetzelfde niveau van de toeleveringsketen, zoals bijvoorbeeld overslag van voorraden tussen klanten als reactie op acute noden. Verticale samenwerking verwijst daarentegen naar samenwerking tussen actoren van verschillende niveaus, zoals klanten die hun daadwerkelijke productgebruik en voorraadniveaus delen met de leverancier. Het “Vendor Managed Inventory (VMI)“-concept, een bedrijfspraktijk gericht op het verlagen van de logistieke kosten en het verbeteren van serviceniveaus in supply chains, is gebaseerd op de verticale samenwerking tussen een leverancier en diens klanten. In een VMI-systeem neemt een leverancier de bevoorradingsbeslissingen voor de aan klanten te leveren producten, gebaseerd op specifiek voorraad- en supply chain-beleid. Bijgevolg wijst het VMI-systeem, in tegenstelling tot het “Retailer Managed Inventory“-systeem waarin elke klant (bijv. retailer) zijn eigen voorraad beheert, de beslissingsbevoegdheid omtrent het voorraadbeheer bij de klanten toe aan de leverancier. Die beslist vervolgens gedurende een planningshorizon wanneer, hoeveel te leveren en hoe leveringen worden gecombineerd in voertuigroutes. (A. Guimarães et al., 2019; Bertazzi et al., 2019; L. C. Coelho et al., 2014; Schenekemberg et al., 2020; Soysal et al., 2019)

Opgelijst moet de leverancier dus drie gelijktijdige beslissingen nemen (Bertazzi et al., 2019; L. Coelho, 2018; L. C. Coelho et al., 2014; Soysal et al., 2019):

1. Wanneer een bepaalde klant te bedienen.
2. Hoeveel aan deze klant te leveren wanneer deze bediend wordt.
3. Hoe klanten te combineren in voertuigroutes.

Het “Vendor Managed Inventory (VMI)”-concept biedt voordelen voor zowel leveranciers als klanten. Klanten profiteren doordat zij geen middelen hoeven te investeren in het beheer van voorraden en bestellingen, terwijl leveranciers de distributiekosten kunnen drukken door een betere coördinatie en synchronisatie van leveringen. Dit impliceert een betere coördinatie van de logistieke operaties voor de leveranciers, met name wat betreft het plannen van leveringsroutes, aangezien ze niet hoeven te wachten op bestelorders van klanten. (A. Guimarães et al., 2019; Bertazzi et al., 2019; L. C. Coelho et al., 2014; Schenekemberg et al., 2020; Soysal et al., 2019)

Vanuit een operationeel perspectief vereist een VMI-systeem het oplossen van een complex combinatorisch optimalisatieprobleem dat bekend staat als het “Inventory-Routing Problem” (IRP). Dit probleem integreert zowel voorraadbeheer, voertuigrouting als leveringsplanning binnen hetzelfde besluitvormingskader en richt zich op de daarnet geschetste situaties waarin een leverancier producten moet leveren aan meerdere geografisch verspreide afnemers, rekening houdend met verschillende beperkingen. In vergelijking met het klassieke “Vehicle Routing Problem” (VRP), vertoont het IRP extra complexiteit vanwege de integratie van het voorraadaspect binnen een besluitvormingsproces dat meerdere periodes beslaat. Een IRP kan zich richten op het minimaliseren van enkel de routeringskosten of op de som van de voorraad- en routeringskosten gedurende de planningshorizon, waarbij voorraadtekorten bij de klanten worden vermeden. Zelfs wanneer enkel de routeringskosten worden geminimaliseerd, verschilt dit probleem van het VRP aangezien de hoeveelheid die in elke periode aan elke klant moet worden geleverd een variabele is in het IRP, terwijl deze hoeveelheid gekend is in het VRP en slechts voor één periode wordt gegeven. Hieruit volgt dat terwijl het VRP wordt beschouwd als een operationeel probleem op korte termijn, het IRP beschouwd wordt als een tactisch probleem op middellange termijn, aangezien het voorraadbeheer omvat en dus een tijdscomponent heeft. (A. Guimarães et al., 2019; Bertazzi et al., 2019; L. Coelho, 2018; L. C. Coelho et al., 2014; Schenekemberg et al., 2020; Soysal et al., 2019)

## 4.2 Classificatie

Sinds de introductie door Bell et al. (1983), is er een breed scala aan IRP-varianten voorgesteld met strategische, tactische en operationele criteria. Coelho et al. (2014) classificeren deze IRP's op basis van hun structurele varianten en de beschikbaarheid van informatie over de vraag. In dit onderdeel zullen deze classificaties verder besproken worden. (L. C. Coelho et al., 2014; Soysal et al., 2019)

### 4.2.1 Structurele varianten

Vanwege het feit dat er de afgelopen 30 jaar talloze varianten van het IRP opgesteld zijn, bestaat er geen standaardversie van het probleem. Hierdoor zijn veel IRP's zeer verschillend in termen van probleemdefinitie en oplossingsbenaderingen. Ondanks dit grote aantal varianten zijn er echter enkele gangbare overwegingen die voorkomen in de meeste IRP-studies. Deze worden beschouwd als de basisversies van het IRP en zijn samengevat in Tabel 2. In deze tabel worden zeven criteria gebruikt om IRP's te classificeren: tijdshorizon, structuur, routing, voorraadbeleid, voorraadbeslissingen, samenstelling vloot en grootte vloot. (A. Guimarães et al., 2019; Andersson et al., 2010; Archetti & Bertazzi, 2021; L. C. Coelho et al., 2014)

| Criteria     | Mogelijke opties |          |  |
|--------------|------------------|----------|--|
| Tijdshorizon | Eindig           | Oneindig |  |

|                             |                    |                        |                    |
|-----------------------------|--------------------|------------------------|--------------------|
| <b>Structuur</b>            | Eén-op-één         | Eén-op-veel            | Veel-naar-veel     |
| <b>Routing</b>              | Direct             | Meerdere               | Continu            |
| <b>Voorraadbeleid</b>       | Maximum level (ML) | Order-up-to level (OU) |                    |
| <b>Voorraadbeslissingen</b> | Gemiste verkopen   | Back-order             | Niet-negatief      |
| <b>Samenstelling vloot</b>  | Homogeen           | Heterogeen             |                    |
| <b>Grootte vloot</b>        | Enkel              | Meerdere               | Zonder beperkingen |

Tabel 2: Structurele varianten van het IRP (Andersson et al., 2010; L. C. Coelho et al., 2014)

De belangrijkste van deze zeven criteria, in het licht van het onderwerp van deze masterproef, zullen nu verder toegelicht worden. Allereerst beschrijft de literatuur over IRP's drie hoofdstructuren van distributienetwerken, variërend op basis van het aantal leveranciers en klanten. Een één-op-één-structuur waarbij één leverancier één klant bedient, een één-op-veel-structuur met één leverancier die een reeks klanten bedient (meest onderzocht) en een veel-op-veel-structuur waarbij meerdere leveranciers een reeks klanten bedienen (minder onderzocht). Daarnaast omvat voorraadbeleid vooraf vastgestelde regels om klanten te bevoorraden. De twee meest voorkomende zijn het maximum-level (ML) beleid, dat het meest gebruikte en flexibelste is, en het order-up-to level (OU) beleid, dat het gangbare alternatief is. Onder een ML-voorraadbeleid heeft de leverancier namelijk de vrijheid om de leveringshoeveelheid per klant te bepalen, enkel begrensd door de voorraad- en voertuigcapaciteit. Bij een OU-beleid daarentegen wordt bij elke levering het voorraadmiveau van de klant aangevuld tot de maximale capaciteit. Verder bepalen voorraadbeslissingen hoe het voorraadbeheer wordt gemodelleerd. Wanneer de voorraad negatief mag worden, vindt er een nabestelling plaats en wordt in een later stadium aan de bijbehorende vraag voldaan. Als er geen nabestellingen toegestaan zijn, wordt de extra vraag beschouwd als omzetverlies. In beide gevallen kan er een boete gelden voor voorraadtekorten. Ten slotte kan het wagenpark homogeen of heterogeen zijn en kan het aantal beschikbare voertuigen worden vastgelegd op één, veel of onbeperkt. (A. Guimarães et al., 2019; L. C. Coelho et al., 2014; Farias et al., 2021; Soysal et al., 2019)

#### 4.2.2 Beschikbaarheid van informatie over de vraag

De tweede classificatie verwijst naar het moment waarop informatie over de vraag bekend wordt. Als deze informatie aan het begin van de planningshorizon volledig beschikbaar is voor de besluitvormer, wordt het probleem als deterministisch beschouwd. Indien alleen de kansverdeling van de klantvraag bekend is, wordt het probleem als stochastisch beschouwd, wat resulteert in het stochastische voorraadrouteringsprobleem (SIRP). De stochasticiteit van de vraag kan leiden tot tekorten en om dit te vermijden wordt, zoals eerder bij voorraadbeslissingen uitgelegd, een boete opgelegd wanneer een klant geen voorraad meer heeft. Meestal wordt deze boete gemodelleerd als een percentage van de niet voldane vraag. Door de toegenomen complexiteit is het SIRP niet op grote schaal onderzocht. Daarenboven blijkt uit de literatuur dat ondanks het feit dat supply chains doorgaans worden gekenmerkt door een grote mate van onzekerheid (stochasticiteit), er ook waardevolle inzichten kunnen worden afgeleid uit de simplistischere deterministische analyses. Dit verklaart waarom de deterministische IRP's gangbaar zijn, zowel vanuit praktisch als academisch perspectief. (Archetti & Bertazzi, 2021; Bertazzi et al., 2019; L. Coelho, 2018; L. C. Coelho et al., 2014)

In het dynamische IRP is de vraag van de klant niet volledig vooraf bekend, maar wordt deze geleidelijk onthuld in de loop van de tijd, namelijk aan het einde van elke periode. In dit geval moet het probleem herhaaldelijk worden opgelost met de beschikbare informatie. Desondanks kan de statistische verdeling van de vraag nog steeds worden gebruikt in het oplossingsproces, wat resulteert in een dynamisch en stochastisch voorraadrouteringsprobleem (DSIRP), waarin de vraag van de klant alleen in probabilistische zin bekend is. Net als bij het SIRP, is het onderzoek naar het DSIRP niet zo wijdverbreid vanwege de toegenomen complexiteit van het probleem. (L. Coelho, 2018; L. C. Coelho et al., 2014)

### 4.3 Doel & assumpties

Het doel van het IRP in haar meest eenvoudigste vorm is het minimaliseren van de totale voorraad- en distributiekosten tijdens de planningshorizon, terwijl tegelijkertijd aan de vraag van elke klant wordt voldaan zodat er geen tekorten optreden. De voorraadkosten kunnen in rekening worden gebracht bij het depot, de klanten, beide of helemaal niet worden meegenomen. In het geval van het SIRP blijft het doel hetzelfde als in het deterministische basisgeval, maar wordt het aangepast om rekening te houden met stochastische en onvoorziene toekomstige parameters. Hier moet de leverancier een distributiebeleid bepalen dat zijn verwachte contante waarde (opbrengsten min de kosten) maximaliseert over de planningshorizon, welke eindig of oneindig kan zijn. (Archetti & Bertazzi, 2021; L. Coelho, 2018; L. C. Coelho et al., 2014; Farias et al., 2021; Soysal et al., 2019)

Het aanvullingsplan van het IRP in haar meest eenvoudigste vorm is onderworpen aan de volgende assumpties (L. C. Coelho et al., 2014):

1. Het voorraadniveau bij elke klant kan nooit zijn maximale capaciteit overschrijden.
2. Voorraadniveaus mogen niet negatief zijn.
3. De voertuigen van de leverancier kunnen maximaal één route per tijdsperiode uitvoeren, die elk beginnen en eindigen bij de leverancier.
4. De voertuigcapaciteit mag niet worden overschreden.

De kern van het oplossen van dit probleem is om voor elke periode te bepalen welke klanten moeten worden bediend, welke voertuigen van de leverancier moeten worden gebruikt, hoeveel er aan elke bezochte klant moet worden geleverd en wat de leveringsroutes zijn. Dit gedefinieerde IRP wordt gekenmerkt als deterministisch en statisch, aangezien de consumptiepatronen vooraf vastliggen en bekend zijn. (Bertazzi et al., 2019; L. C. Coelho et al., 2014)

### 4.4 Werking

Het "Inventory-Routing Problem" (IRP) wordt geclassificeerd als NP-hard, voornamelijk omdat het een subprobleem omvat dat ook NP-hard is, namelijk het "Vehicle Routing Problem" (VRP). Dit houdt in dat het vinden van een optimale oplossing binnen een redelijke tijdspanne onhaalbaar is naarmate de probleemgrootte toeneemt. Als gevolg hiervan stellen de meeste papers heuristieken voor, die benaderende oplossingen bieden die relatief snel te berekenen zijn. Niettemin zijn er ook exacte algoritmen ontwikkeld die onder bepaalde omstandigheden een optimale oplossing kunnen garanderen. (L. C. Coelho et al., 2014; Li et al., 2011)

Deze exacte algoritmen ontwikkeld voor het IRP omvatten branch-and-cut (ook gebruikt en uitgelegd in Sectie 3.1.2 over het 2E-VRP), branch-and-price en meer recentelijk branch-price-and-cut algoritmes. Archetti et al. (2007) waren pioniers in het ontwikkelen van een branch-and-cut-algoritme voor een IRP met één voertuig. Dit algoritme is in staat om zowel de Order-Up-To (OU) als de Maximum Level (ML) varianten op te lossen en incorporeert de voorraadkosten bij zowel de klanten als de leverancier. Beperkingen voor het elimineren van subtours worden dynamisch toegevoegd als “cuts” in de zoekboom wanneer een bestaande oplossing deze schendt. Het algoritme slaagde erin om binnen twee uur rekentijd instanties op te lossen met maximaal 50 klanten over een horizon van drie perioden en 30 klanten over een horizon van zes perioden. (Archetti & Bertazzi, 2021; Bertazzi et al., 2019; L. Coelho, 2018; L. C. Coelho et al., 2014; Farias et al., 2021)

Recentelijk zijn er ook algoritmen geïntroduceerd die in staat zijn om exacte versies van het IRP met meerdere voertuigen op te lossen. Dit zijn branch-and-cut algoritmen gemodelleerd door Coelho en Laporte (2013) en Adulyasak, Cordeau en Jans (2014). Deze algoritmen breiden de formulering van Archetti et al. (2007) uit onder het OU- en ML-beleid om rekening te houden met meerdere voertuigen. Deze formulering is in staat om instanties op te lossen met maximaal 45 klanten, drie perioden en drie voertuigen. (L. C. Coelho et al., 2014)

Zoals eerder gesteld zijn vanwege de complexiteit van IRP's de meeste algoritmen die met succes worden toegepast op grote IRP-instanties heuristieken, doordat ze efficiënter en toepasbaarder zijn dan exacte methoden. Deze heuristieken zijn geleidelijk geëvolueerd van eenvoudige uitwisselingsschema's naar meer geavanceerde metaheuristieken, soms in combinatie met exacte methoden. Bovendien zijn in de afgelopen jaren met succes matheuristische algoritmen uitgebreid en toegepast op een breed scala aan routeringsproblemen en geïntegreerde logistieke problemen waarin het routeringsgedeelte een belangrijke rol speelt, zoals IRP's. De complexere meta- en matheuristieken zullen in de volgende alinea verder worden toegelicht. (Archetti & Bertazzi, 2021; Bertazzi et al., 2019; L. Coelho, 2018; L. C. Coelho et al., 2014; Iswari, 2023)

Het vroege onderzoek rond het IRP richtte zich voornamelijk op het toepassen van eenvoudige heuristieken op vereenvoudigde versies van het probleem. Deze eenvoudige heuristische benaderingen maakten meestal gebruik van simpele neighborhood structuren en bestaan uit het ontleden van het IRP in subproblemen, die in hiërarchische volgorde worden opgelost. De huidige heuristische algoritmen zijn in staat om ook hoogwaardige oplossingen te vinden voor complexe optimalisatieproblemen. Deze algoritmen vertrouwen zoals in de vorige alinea opgemerkt op het concept van metaheuristieken, wat probleemoplossende methodologieën zijn op hoog niveau, die de zoektocht naar oplossingen voor complexe optimalisatieproblemen begeleiden. Daarnaast omvatten nieuwe ontwikkelingen in algoritmes ook de hybridisatie van verschillende metaheuristische concepten en zogenaamde matheuristische algoritmen. Matheuristische algoritmen combineren krachtige wiskundige programmeertechnieken met heuristische benaderingen. Recente IRP papers die een aantal van deze technieken gebruiken zijn onder meer iterated local search (Ribeiro & Lourenço, 2003), variable neighborhood search (Zhao et al., 2008), tabu search (Archetti et al., 2012) en adaptive large neighborhood search, waarvan de laatste drie ook worden toegepast in het VRP. (Archetti & Bertazzi, 2021; L. Coelho, 2018; L. C. Coelho et al., 2014)

Ter illustratie, werkt een driefasig matheuristisch algoritme voorgesteld door Coelho et al. (2018) om een IRP met meerdere voertuigen en depots op te lossen als volgt:

1. Clusteringfase: in deze initiële fase wordt een integer-programma gebruikt om de klanten te verdelen in clusters, één cluster voor elk depot, op basis van een kwantitatieve meting van het kritieke voorraadniveau van elke klant.
2. Routeringsconstructiefase: in de tweede fase, wordt een reeks intra- en inter-cluster routes gegenereerd waarbij rekening wordt gehouden met beperkte middelen in termen van voertuigcapaciteit en het maximale aantal klanten dat vanuit een leverancier kan worden bediend. Het eerste type route bezoekt alleen klanten binnen het cluster, terwijl het tweede type ook grensklanten omvat die buiten het cluster liggen maar toch dichtbij genoeg zijn. Deze aanpak voegt flexibiliteit toe aan het routeplanningsproces.
3. Optimalisatiefase: in deze laatste fase wordt een gemengd-integer lineair programmeringsformulering opgelost op basis van routes. Hierbij worden leveringsroutes geselecteerd en leveringshoeveelheden bepaald voor elke klant gedurende een specifieke periode binnen de tijdshorizon. Het doel is om een haalbare oplossing te verkrijgen voor het IRP.

De resultaten van deze matheuristische benadering werden vergeleken met die van een branch-and-cut algoritme, waaruit bleek dat de matheuristiek aanzienlijk beter presteerde in termen van oplossingskwaliteit en rekentijd. (L. Coelho, 2018)

## 4.5 Extensies: 2E-IRP

Naarmate het onderzoek naar het IRP is gegroeid, zijn er door de jaren heen ook talrijke extensies van het basis IRP-model onderzocht. Deze extensies omvatten onder meer het productierouteringsprobleem (dat het probleem van de lotgroottes en het VRP integreert), het IRP met meerdere producten, het IRP met directe leveringen en overslag en het consistente IRP (dat aspecten zoals personeelsbeheer in het IRP integreert). (L. C. Coelho et al., 2014; Iswari, 2023)

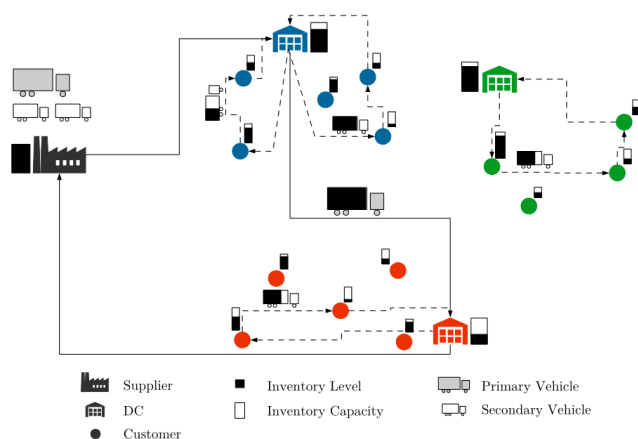
In het kader van deze masterproef ligt de focus echter op een nieuwe, geavanceerde, versie van het IRP, dat uitgaat van een supply chain-systeem met twee echelons. In dit probleem heeft de middelste laag, zoals het SCC, de controle over voorraad- en routeringsbeslissingen met betrekking tot het ophalen en de levering van producten. Elk echelon kan verschillende spelers bevatten, wat resulteert in veel-naar-veel supply chain-structuren. Echter, het onderzoek hiernaar bevindt zich nog in een beginfase, met slechts een beperkt aantal studies die zich telkens richten op specifieke varianten binnen een multi-echelon context. Deze studies verkennen diverse configuraties, inclusief scenario's in een stedelijke omgeving. Een voorbeeld hiervan is de studie van Farias et al. (2021), waarin een 2E-IRP met stedelijke kenmerken werd onderzocht onder verschillende configuraties (situaties met één voertuig, gedeelde voertuigen en meerdere trips) en verschillende vormen van het in sectie 4.2.1 geïntroduceerde voorraadbeleid (Maximum Level (ML), Order-Up-To Level (OU) en Order Fixed Quantity (OFQ)). (A. Guimarães et al., 2019; L. C. Coelho et al., 2014; Farias et al., 2021; Iswari, 2023; Schenekemberg et al., 2020)

Wat betreft overeenkomsten met IRP's die in de literatuur zijn bestudeerd, wordt op het 2E-IRP een IRP-subprobleem opgelost om aan de klantbehoeften voor elk SCC te voldoen. Op het eerste echelon

wordt een IRP beheerd door de leverancier die aan de SCC's levert. Echter, vanwege het gebruik van gedeelde middelen door de SCC's, is het afzonderlijk oplossen van de subproblemen geen garantie voor een globale optimale oplossing, zoals ook werd aangegeven in de onderdelen over het 2E-VRP en het twee-echelon voorraadsysteem. Verder is het 2E-VRP dan weer dichtverwant aan het 2E-IRP routing subprobleem, omdat in beide problemen een homogeen wagenpark van primaire voertuigen beschikbaar is om de SCC's te bevoorraden en een homogeen wagenpark van secundaire voertuigen gedeeld door SCC's beschikbaar is om klanten te bevoorraden. Ten slotte zijn logischerwijs net als in het 2E-VRP directe leveringen aan de klanten niet toegestaan op basis van een assumptie. Deze assumpties zullen in de volgende sectie opgelijst worden. (Farias et al., 2021; Li et al., 2011)

#### 4.5.1 Doel & assumpties

Aan de hand van de paper van Farias et al. (2021) worden nu het doel van het 2E-IRP en de meest gangbare assumpties in de bestudeerde literatuur beschreven. Zoals eerder gesteld, is het 2E-IRP een nieuwe extensie van het klassieke IRP waarbij er twee echelons zijn. In het eerste echelon dient de leverancier te voldoen aan de eisen van een set SCC's, die op hun beurt moeten tegenmoetkomen aan de periodieke eisen van een set klanten op het tweede echelon. Figuur 6 illustreert dit 2E-IRP. (Farias et al., 2021; Rohmer et al., 2019)



*Figuur 6: Schematische voorstelling van het 2E-IRP (Farias et al., 2021)*

Het doel van het 2E-IRP probleem is om een geïntegreerde voorraad- en routeringsstrategie te bepalen die de totale kosten, bestaande uit zowel voorraad- als transportkosten, minimaliseert zodat gedurende elke periode aan de eisen van de eindklant (bijv. retailer) wordt voldaan. Specifieker, zijn die voorraad- en transportkosten de som van vaste primaire en secundaire voertuigkosten, transportkosten op beide echelons, orderkosten van zowel SCC's als klanten en voorraadkosten op beide echelons. Een vergelijkbaar doel wordt tevens in andere papers over het 2E-IRP geformuleerd. (A. Guimarães et al., 2019; Farias et al., 2021; Iswari, 2023; Li et al., 2011; Rohmer et al., 2019; Zhao et al., 2008)

Hieruit volgen de herziene beslissingen voor het 2E-IRP ten opzichte van het meest eenvoudige IRP probleem, uitgaande van een twee-echelon systeem met één leverancier, een set SCC's en meerdere klanten (A. Guimarães et al., 2019; Farias et al., 2021; Rohmer et al., 2019):

1. Wanneer en hoeveel moet de leverancier leveren aan de SCC's ?
2. Wanneer en hoeveel moet er vanuit de SCC's aan de klanten worden geleverd?

3. Wat is de optimale routing van de SCC's naar de klantlocaties voor de verschillende tijdsperioden?
4. Wat is de optimale routing van de leverancier naar de SCC's voor de verschillende tijdsperioden?

Deze opzet van het 2E-IRP probleem leidt tot enkele algemene assumpties, gebaseerd op Farias et al. (2021) en in overeenstemming met andere onderzoeken rond dit onderwerp (A. Guimarães et al., 2019; Farias et al., 2021; Li et al., 2011; Rohmer et al., 2019):

1. Rechtstreekse leveringen van de leverancier aan klanten zijn niet toegestaan (m.u.v. Li et al. (2011)).
2. Elk SCC moet voldoen aan de vraag naar één product van een subset van klanten, zodat elk SCC een subset van klanten op het tweede echelon bevoorraadt.
3. De subset van klanten toegewezen aan elk SCC is bekend.
4. Een vloot van homogene primaire voertuigen met een grote capaciteit is beschikbaar voor leveringen van de leverancier aan de SCC's.
5. Een ander wagenpark van homogene secundaire voertuigen met een kleinere capaciteit is beschikbaar voor leveringen van de SCC's aan de klanten. Deze configuratie van voertuigen wordt "shared vehicle" genoemd.
6. Een primair voertuig kan meerdere SCC's bezoeken op een route die begint en eindigt bij de leverancier, zolang de capaciteit wordt gerespecteerd.
7. Gelijkaardig kan een secundair voertuig meerdere klanten van een SCC bezoeken op een route die begint en eindigt bij het SCC, met inachtneming van de capaciteit ervan.
8. Voorraadtekorten zijn niet toegestaan.

#### 4.5.2 Werking

Van het 2E-IRP kan logischerwijs worden aangetoond dat het NP-hard is, via reductie tot het IRP. Gezien de toegenomen complexiteit ten opzichte van het IRP probleem voor één echelon, is de aangewezen oplossingsmethode voor het NP-hard 2E-IRP een tweefasig matheuristisch algoritme om efficiënt grote instanties op te lossen. Deze matheuristiek gebruikt een metaheuristiek in combinatie met meestal een exact B&C algoritme, doordat deze exacte methode ook in het IRP en 2E-VRP toegepast wordt. (Farias et al., 2021; Li et al., 2011; Rohmer et al., 2019; Schenekemberg et al., 2020)

Zo stelt Guimaraes et al. (2019), vergelijkbaar met Rohmer et al. (2019) en Schenekemberg et al. (2020), een wiskundige formulering voor die in staat is om alle beslissingen van het systeem af te handelen. Zoals in de vorige alinea aangehaald, om het probleem efficiënt op te kunnen lossen voor grote gevallen, stellen ze een matheuristiek voor dat een exacte B&C benadering combineert met een metaheuristisch algoritme dat een subprobleemformulering integreert met behulp van een ALNS-heuristiek (Adaptive Large Neighborhood Search). In deze matheuristiek is er een flexibele metaheuristische fase waarin voertuigroutes worden behandeld door het ALNS-mechanisme, terwijl productafhalingen, productleveringen en routeringsverbeteringen worden uitgevoerd door een subprobleem exact op te lossen. (A. Guimarães et al., 2019; Farias et al., 2021; Rohmer et al., 2019; Schenekemberg et al., 2020)

#### 4.5.3 Stand van literatuur

Het onderzoek naar voorraadaspecten in multi-echelon routeringsproblemen is zoals eerder vermeld relatief beperkt. Het 2E-IRP bevindt zich bijgevolg nog in zijn beginfase, met slechts een gering aantal gepubliceerde IRP-studies die rekening houden met twee-echelon netwerken, waarvan enkele reeds aangehaald zijn in dit onderdeel (Sectie 4.5). Een mogelijke verklaring hiervoor is de complexiteit van dergelijke modellen. Doordat er naar meerdere echelons wordt gekeken, wordt het geïntegreerde supply chain management en besluitvormingsproces gecompliceerder. De papers rond het 2E-IRP die in deze masterproef zijn gebruikt, zijn Farias et al. (2021), Li et al. (2011), Rohmer et al. (2019), Guimarães et al. (2019) en Schenekemberg et al. (2020). Deze studies richten zich op specifieke varianten binnen een multi-echelon context, met diverse settingen (één of meerdere leveranciers/SCC's/klanten, ...) en configuraties (single-vehicle, shared-vehicle, multi-trip, tijdsvensters, ...). Echter, alleen Farias et al. (2021) onderzoeken een 2E-IRP met stedelijke kenmerken, de andere papers richten zich uitsluitend op algemene routeringsproblemen en hebben geen specifieke focus op een stadslogistieke context. (A. Guimarães et al., 2019; Farias et al., 2021; 2023; Li et al., 2011; Schenekemberg et al., 2020)

## 5 Praktijkonderzoek

Het praktijkgedeelte van deze masterproef begint met een introductie van het doel en de context van dit onderzoek. Vervolgens worden de gebruikte data en het simulatiemodel gepresenteerd. Na de introductie van deze elementen volgt een gedetailleerde beschrijving van de experimentele opzet. De resultaten van deze experimenten worden uitgebreid besproken, waarna het praktijkgedeelte wordt afgesloten met een conclusie.

### 5.1 Introductie simulatiemodel

#### 5.1.1 Doel

Uit de literatuurstudie, zoals beschreven in de onderdelen over stedelijke consolidatiecentra (Sectie 2), twee-echelon netwerken (Sectie 3) en het IRP (Sectie 4), is gebleken dat de integratie en coördinatie van beslissingen omtrent de levering en opslag van producten in een stedelijk twee-echelon distributiesysteem met een SCC cruciaal zijn voor de financiële levensvatbaarheid ervan door de potentieel hoge operationele kosten. Hieromtrent zijn er verschillende algoritmische modellen ontwikkeld om de levering van producten en de routing ervan te optimaliseren, met als doel zo kostenefficiënt mogelijk te zijn. Echter, deze modellen worden voornamelijk toegepast op het tweede echelon, zoals tussen een SCC en retailers, met modellen als het IRP en VRP.

In de praktijk blijft het eerste echelon met leveringen van leveranciers aan een SCC daarom vaak suboptimaal, ondanks het bestaan van modellen die beide echelons behandelen, zoals besproken in de literatuurstudie. Deze modellen zijn echter nog niet breed ingeburgerd in de praktijk en het onderzoek naar deze categorie van modellen staat nog niet zo ver als dat naar modellen voor netwerken met slechts één echelon, vanwege de toegenomen complexiteit. Dit geldt in het bijzonder voor het onderzoek naar voorraadaspecten in de stadslogistiek (Farias et al., 2021; Iswari, 2023).

Hierdoor is het opzet van dit onderdeel van de masterproef om gegeven een reeds geoptimaliseerd tweede echelon, betreffende de leveringshoeveelheden van een SCC aan retailers en de bijhorende routes, een methode te vinden om de leveringshoeveelheden in het eerste echelon te optimaliseren. Dit met behulp van een in dit onderdeel te ontwikkelen model. Ook zal er worden onderzocht hoe opslag in het SCC zelf hiertoe kan bijdragen, een aspect dat in de literatuur slechts beperkt onderzocht is maar een interessante piste is om het SCC financieel rendabel te maken, in combinatie met bijvoorbeeld de in sectie 2.3 beschreven diensten met toegevoegde waarde. Via het opgestelde model zal de impact op de kosten geëvalueerd kunnen worden van het afstemmen van de leveringshoeveelheden en -tijden in het eerste echelon op het geoptimaliseerde tweede echelon.

Bijgevolg is het doel van het model om de kosten in het eerste echelon te verlagen. Hiermee wordt beoogd aan te tonen dat door coördinatie en integratie, via het uitwisselen van informatie over leveringshoeveelheden tussen de twee echelons, de kosten in het distributiesysteem verder kunnen worden verlaagd. Deze optimalisatieoefening op het eerste echelon kan ook bijdragen aan een verbeterd gebruik van beschikbare ruimte en middelen, hetgeen de nood aan overtollige voorraad reduceert en de transportkosten minimaliseert (Iswari, 2023).

### 5.1.2 Context

In meer detail wordt er voor dit praktijkgedeelte als basis een situatie met een stedelijk twee-echelon distributiesysteem genomen, waarbij één SCC alle producten verzamelt van verschillende leveranciers  $S = \{1, 2, \dots, |S|\}$  buiten het stedelijk gebied voordat deze de retailers in de stad bereiken  $R = \{1, 2, \dots, |R|\}$ . De retailers worden geconfronteerd met een vraag van hun klanten naar verschillende producten  $P = \{1, 2, \dots, |P|\}$ , gedurende een vooraf gedefinieerde planningshorizon met meerdere perioden  $T = \{1, 2, \dots, |T|\}$ . Bijgevolg plaatsen retailers bestellingen voor de benodigde producten bij verschillende leveranciers, waarbij elke leverancier verantwoordelijk is voor één specifiek producttype. Het wordt verondersteld dat retailers een beperkte opslagcapaciteit hebben, met bijbehorende bewaarkosten. (Iswari, 2023)

Een scenario, ontwikkeld door Iswari (2023) voor haar doctoraat over het analyseren van de voordelen van een SCC en geïntegreerde beslissingen over voorraadrouting, wordt beschouwd waarin inventarisatie- en routeringsbeslissingen gelijktijdig worden genomen voor het tweede echelon. Het SCC bepaalt namelijk tegelijkertijd of en hoeveel producten van elk type elke periode aan de retailers worden geleverd, samen met de bijbehorende leveringsroutes, om te zorgen voor voldoende voorraad bij de retailers. De inventarisatie- en routeringsbeslissingen worden bijgevolg tegelijkertijd geoptimaliseerd door het SCC. Dit resulteert in een IRP over meerdere perioden met meerdere producten, tijdvensters, een heterogeen wagenpark en meerdere ritten. (Iswari, 2023)

Zoals reeds aangehaald bij het doel van het praktijkgedeelte (Sectie 5.1.1) wordt er voor dit onderdeel van de masterproef gefocust op het eerste echelon, waarbij in het scenario leveranciers alle benodigde producten in elke periode leveren aan het SCC met bestelwagens door middel van directe ritten. Het benodigde aantal producten wordt berekend aan de hand van het eerder genoemde IRP op het tweede echelon. De transportkosten van het eerste echelon worden in het scenario berekend door het aantal ritten te bepalen dat nodig is voor elke leverancier  $s \in S$  in elke periode  $t \in T$  om hun producten af te leveren en vervolgens de bijbehorende kosten te berekenen. Het aantal ritten wordt bepaald door het aantal geleverde producten te delen door de capaciteit van het voertuig. (Iswari, 2023)

### 5.1.3 Data

De benodigde data, verstrekt door Titi Iswari, omvatten drie categorieën: de resultaten van het scenario (de belangrijkste data), de input data van het scenario en ruwe data zoals coördinaten of locaties van de knooppunten (SCC, leveranciers en retailers), voertuigkenmerken, vraag van de retailers, enzovoort. (Iswari, 2023)

De resultaten van het scenario bestaan uit informatie over de kosten voor beide echelons (inclusief de kosten van een retourrit op het eerste echelon), de leveringsfrequenties voor het eerste echelon, de leveringshoeveelheid vanuit het SCC aan elke retailer per periode, de voorraadniveaus bij de retailer en de optimale routes voor het tweede echelon. Deze resultaten werden bijgehouden over veertien periodes in verschillende configuraties met een combinatie van tien of dertig retailers, twee of zes leveranciers en hoge of lage voorraadkosten bij de retailers. Voor elke configuratie werden er 10 instanties uitgevoerd met variërende waarden voor bepaalde parameters, wat resulteerde tot een totaal van 80 ( $= 2 * 2 * 2 * 10$ ) instanties. De instantie-eigen parameters met specifieke waarden

betreffen de locaties van leveranciers en retailers, de voorraadkosten bij de retailers en de dagelijkse vraag naar producten van klanten bij de retailers. (Iswari, 2023)

De leveringshoeveelheid van het SCC aan elke retailer in elke periode vormt een cruciaal onderdeel van het te ontwikkelen model voor het eerste echelon. Ter illustratie volgt hieronder een voorbeeld uit de resultaten van het scenario, betreffende een probleeminstantie met tien retailers en zes leveranciers (Iswari, 2023):

| DELIVERY AMOUNT |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     |     |
|-----------------|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Product 1       |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     |     |
| t1              | t2  | t3  | t4 | t5  | t6  | t7  | t8  | t9 | t10 | t11 | t12 | t13 | t14 |
| 76              | 0   | 0   | 0  | 114 | 0   | 0   | 0   | 0  | 0   | 76  | 0   | 0   | 0   |
| 0               | 0   | 44  | 0  | 132 | 0   | 0   | 0   | 0  | 0   | 88  | 0   | 0   | 0   |
| 0               | 156 | 0   | 0  | 0   | 103 | 92  | 0   | 0  | 0   | 156 | 0   | 0   | 0   |
| 80              | 0   | 0   | 0  | 0   | 0   | 160 | 0   | 0  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 0               | 92  | 0   | 0  | 0   | 115 | 0   | 0   | 0  | 0   | 92  | 0   | 0   | 0   |
| 0               | 39  | 0   | 0  | 0   | 117 | 0   | 0   | 0  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 170             | 0   | 0   | 0  | 0   | 170 | 0   | 0   | 0  | 0   | 136 | 0   | 0   | 0   |
| 100             | 0   | 0   | 0  | 0   | 0   | 0   | 140 | 0  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 0               | 0   | 160 | 0  | 0   | 0   | 160 | 0   | 0  | 0   | 160 | 0   | 0   | 0   |
| 0               | 0   | 100 | 0  | 0   | 0   | 0   | 140 | 0  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |

*Figuur 7: Voorbeeld leveringshoeveelheid SCC aan elke retailer*

De tabel in Figuur 7 met de leveringshoeveelheden van het SCC aan elke retailer voor product 1 is opgedeeld in kolommen die de veertien periodes representeren en rijen die de tien verschillende retailers vertegenwoordigen. Volgens de methode van Iswari (2023) wordt er indien op tijdstip  $t \in T$  één of meer van de tien retailers een levering nodig hebben van het SCC, een rit (of meerdere) uitgevoerd van de leverancier naar het SCC. De kosten voor het eerste echelon worden vervolgens berekend door het aantal ritten per leverancier te vermenigvuldigen met de kosten van een retourrit voor elke leverancier, deze kosten verschillen per instantie (Iswari, 2023):

```

Delivery frequency for supplier 1 = 8
Delivery frequency for supplier 2 = 8
Delivery frequency for supplier 3 = 9
Delivery frequency for supplier 4 = 9
Delivery frequency for supplier 5 = 8
Delivery frequency for supplier 6 = 7
Cost of a single trip (round trip) for supplier 1 = 95.5715
Cost of a single trip (round trip) for supplier 2 = 46.3791
Cost of a single trip (round trip) for supplier 3 = 27.4177
Cost of a single trip (round trip) for supplier 4 = 66.7457
Cost of a single trip (round trip) for supplier 5 = 64.4745
Cost of a single trip (round trip) for supplier 6 = 79.6416
1st echelon_TOTAL COST: 3056.36

```

```

TOTAL COST (1st and 2nd echelons): 6877.06

```

*Figuur 8: Voorbeeld overzicht eerste echelon*

#### 5.1.4 Wiskundig model

De opzet van het model is om per product  $p \in P$  de leveringen aan het stedelijk consolidatiecentrum (SCC) te optimaliseren gedurende alle periodes  $t \in T$  (1,...,14). Dit gebeurt door strategisch gebruik te maken van voorraadopslag in het SCC. Concreet moet het model, op basis van de leveringshoeveelheid van het SCC aan elke retailer per periode, bepalen hoeveel producten er in elke

periode aan het SCC moeten worden geleverd om de kosten te minimaliseren. Deze kosten bestaan uit een leveringskost van de leverancier per levering per periode en een voorraadkost bij het SCC per eenheid per periode. In het model wordt de leveringshoeveelheid van het SCC aan elke retailer per periode beschouwd als een vraag naar product  $p$  van elke retailer per periode. De leveringen van de leveranciers aan het SCC worden beperkt door de voertuigcapaciteit van de bestelwagens en de opslagcapaciteit van het SCC.

Het algemene wiskundige model met verscheidene variabelen, een parameter en enkele capaciteiten is vervolgens als volgt opgesteld:

Variabelen:

$L_{pt}$ : Aantal eenheden van product  $p$  dat in periode  $t$  wordt geleverd aan het SCC.

$I_{pt}$ : Voorraad van product  $p$  in het SCC aan het einde van periode  $t$ .

$T_{pt}$ : Aantal trips voor product  $p$  in periode  $t$ .

Parameter:

$D_{prt}$ : Vraag naar product  $p$  van retailer  $r$  in periode  $t$ .

Kosten:

$C_{pt}^T$ : Leveringskost voor product  $p$  per trip in periode  $t$ .

$C_{pt}^I$ : Voorraadkost voor product  $p$  per eenheid in periode  $t$ .

Capaciteiten:

$V_t$ : Capaciteit van het voertuig.

$O_t$ : Opslagcapaciteit van het SCC.

Doelfunctie:

$$\min Z = \sum_{p,t} (C_{pt}^T \cdot T_{pt} + C_{pt}^I \cdot I_{pt}) \quad (1)$$

Beperkingen:

$$L_{p1} - I_{p1} = \sum_r D_{pr1}, \forall p \quad (2)$$

$$I_{pt-1} + L_{pt} - I_{pt} = \sum_r D_{prt}, \forall p, \forall t \geq 2 \quad (3)$$

$$\frac{L_{pt}}{V_t} \leq T_{pt}, \forall p, \forall t \quad (4)$$

$$L_{pt} \geq 0, I_{pt} \geq 0, \forall p, \forall t \quad (5)$$

$$\sum_p I_{pt} \leq O_t, \forall t \quad (6)$$

$$L_{pt}, I_{pt}, T_{pt} \in \mathbb{Z}_0^+ \quad (7)$$

De doelfunctie (1) betreft zoals eerder vermeld het minimaliseren van de leveringskosten van de leverancier per trip per periode en de voorraadkosten bij het SCC per eenheid per periode. Beperkingen (2) en (3) waarborgen dat aan de vraag van de retailers wordt voldaan, voor elk product  $p$  en in elke periode  $t$  moet de voorraad plus levering namelijk voldoen aan de som van de geleverde hoeveelheid van het SCC aan elke retailer. Vermits er wordt aangenomen dat er geen beginvoorraad is in de eerste periode, is in periode  $t = 1$  voor elk product  $p$  de totale vraag van de retailers enkel gelijk aan de levering minus de eindvoorraad. In alle andere periodes wordt er ook rekening gehouden met de beginvoorraad, wat overeenkomt met de eindvoorraad van de vorige periode  $t - 1$ . Beperking (4) houdt verband met de voertuigcapaciteit en het aantal trips dat via  $\frac{L_{pt}}{V_t}$  berekend wordt. Beperking (5) zorgt ervoor dat de variabelen voor de levering  $L_{pt}$  en voorraad  $I_{pt}$  niet negatief mogen zijn. Tevens wordt in beperking (7) aangenomen dat de waarden van alle variabelen gehele getallen moeten zijn. Beperking (6) tot slot garandeert dat de voorraad van alle producten samen de opslagcapaciteit van het SCC niet mag overschrijden in periode  $t$ .

## 5.2 Opzet experimenten

Voor de uitvoering van diverse experimenten met het model wordt er gebruik gemaakt van de LINGO-software. Het model is gedurende veertien periodes getest op twee configuraties met respectievelijk tien en dertig retailers, beide in combinatie met zes leveranciers/producten. Voor beide configuraties worden de tien instanties uitgevoerd met de lage voorraadkosten bij de retailers. Het model gebruikt als input de data die voor elk product  $p \in P$  de totale levering van het SCC aan de retailers op periode  $t \in T$  ( $1, \dots, 14$ ) geeft,  $\sum_r D_{prt}$ , berekend in Excel. Deze gegevens zijn afgeleid van de tabellen, zoals weergegeven in Figuur 7, met de leveringshoeveelheden van het SCC aan de retailers per product,  $D_{prt}$ , uit de resultaten per instantie. De leveringskosten per trip,  $C_{p_t}^T$ , worden tevens overgenomen uit de resultaten van het scenario per instantie. Hieronder volgt ter illustratie de totale vraag van alle tien de retailers per periode naar product 1 uit het eerder gepresenteerde voorbeeld in Figuur 7.

| Periode | 1   | 2   | 3   | 4 | 5   | 6   | 7   | 8   | 9 | 10 | 11  | 12 | 13 | 14 |
|---------|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|---|----|-----|----|----|----|
| Vraag   | 426 | 287 | 304 | 0 | 246 | 505 | 412 | 280 | 0 | 0  | 708 | 0  | 0  | 0  |

Tabel 3: Totale vraag Product 1

In het onderzoek van Iswari (2023) zijn er zoals vermeld twee niveaus van voorraadkosten, namelijk laag en hoog. Voor elke retailer zijn de lage voorraadkosten willekeurig gegenereerd tussen €0,01 en €0,05 per eenheid per periode. In instanties met hoge voorraadkosten worden deze waarden vertienvoudigd. Vermits aangenomen wordt dat er een lagere voorraadkost is bij het SCC, is deze gelijk gesteld aan €0,01 per eenheid. De totale opslagcapaciteit bij het SCC is vastgesteld op 9000 eenheden, hetgeen het tienvoudige is van de totale opslagcapaciteit bij de retailers. Deze hebben namelijk een capaciteit van 150 eenheden per product, voor zes producten, wat resulteert in een totale opslagcapaciteit van 900 eenheden. De voertuigcapaciteit is ten slotte gelijkgesteld aan die van een bestelwagen in het scenario van Iswari (2023), zijnde 2000 eenheden. Hieronder volgt in Tabel 4 een overzicht van deze vaste parameters in het model, gelijk over alle instanties. (Archetti et al., 2007; Iswari, 2023)

| Parameter | Waarde |
|-----------|--------|
|-----------|--------|

|                               |                   |
|-------------------------------|-------------------|
| <b>Aantal perioden</b>        | 14 periodes       |
| <b>Aantal producten</b>       | 6 producten       |
| <b>Capaciteit SCC</b>         | 9000 eenheden     |
| <b>Capaciteit bestelwagen</b> | 2000 eenheden     |
| <b>Voorraadkost SCC</b>       | €0,01 per eenheid |

Tabel 4: Waardes vaste parameters

Zoals eerder vermeld, zal het LINGO model uitgevoerd worden op in totaal twintig instanties, tien voor de configuratie met tien retailers en tien voor de configuratie met dertig retailers. Lingo past de exacte oplossingsmethode “Branch-and-bound” toe, die reeds aangehaald is in de sectie 3.1.2. Om te vermijden dat het LINGO model te lang door blijft lopen, wordt er de assumptie gemaakt dat het model voor een maximum van 15 minuten uitgevoerd wordt. Hierdoor is er een, kleine, kans op een suboptimale oplossing. Voor elke instantie levert het model de geoptimaliseerde waarde van de totale kosten in de doelfunctie (1), samen met de corresponderende waarden voor  $L_{pt}$ ,  $I_{pt}$  en  $T_{pt}$ .

Op basis van de verkregen resultaten met Lingo zullen voor elke instantie de volgende statistieken worden berekend en bijgehouden in Excel: leveringskosten, voorraadkosten, totale kosten, logistieke ratio, gemiddelde beladingsgraad van bestelwagens en de gemiddelde bezettingsgraad van het SCC. De leveringskosten worden zoals in het model berekend door voor elk product  $p$ , het aantal trips in periode  $t$  te vermenigvuldigen met de leveringskost per trip voor dat product. De voorraadkosten worden berekend door het aantal producten dat opgeslagen is in het SCC gedurende de veertien periodes te vermenigvuldigen met de voorraadkost per eenheid, zijnde €0,01. De totale kosten zijn dan de som van de leverings- en voorraadkosten. De logistieke ratio is vervolgens berekend als de verhouding tussen de totale kosten en de totale gedistribueerde hoeveelheid. Dit geeft inzicht in de gemiddelde kosten om één eenheid product te distribueren. Tenslotte worden de gemiddelde beladingsgraad van de bestelwagens en de bezettingsgraad van het SCC bepaald door de gemiddelde belading en bezetting te delen door de capaciteit van beide. (Archetti et al., 2017; Iswari, 2023)

Deze statistieken voor het geoptimaliseerde model kunnen vervolgens vergeleken worden met die van het originele model. De resultaten en statistieken van het originele model worden tevens in Excel berekend, volgens de in de data-sectie (Sectie 5.1.3) geschetste methode van Iswari (2023). Bij het rapporteren van de resultaten voor beide configuraties, zullen de gemiddelden over alle tien de instanties heen worden gebruikt, zowel voor de geoptimaliseerde waardes van  $L_{pt}$ ,  $I_{pt}$  en  $T_{pt}$  als voor de diverse statistieken. Deze aanpak zorgt voor een representatieve weergave van beide configuraties, rekening houdend met de verschillen in resultaten per instantie door de instantie-eigen parameters.

Voor de vergelijking tussen de configuraties met tien en dertig retailers wordt er, naast de logistieke ratio en gemiddelde beladingsgraad, gebruik gemaakt van de gemiddelde kosten per afleverpunt en het aantal trips per afleverpunt. Hierbij worden de totale waarden over alle perioden gedeeld door het product van het aantal retailers en het aantal leveranciers in elke configuratie. Deze methode maakt het mogelijk om een faire vergelijking te maken tussen de verschillende probleemgroottes. (Iswari, 2023)

### 5.3 Resultatenbespreking

In dit onderdeel zullen eerst de resultaten besproken worden voor zowel de configuratie met tien retailers als die met dertig retailers. Zoals eerder vermeld in de opzet van de experimenten (Sectie 5.2), worden hiervoor de gemiddelde waarden over de tien instanties van elke configuratie gebruikt. Vervolgens zullen deze resultaten met elkaar worden vergeleken en wordt de impact van een verandering in de opslagcapaciteit van het SCC op beide configuraties geanalyseerd.

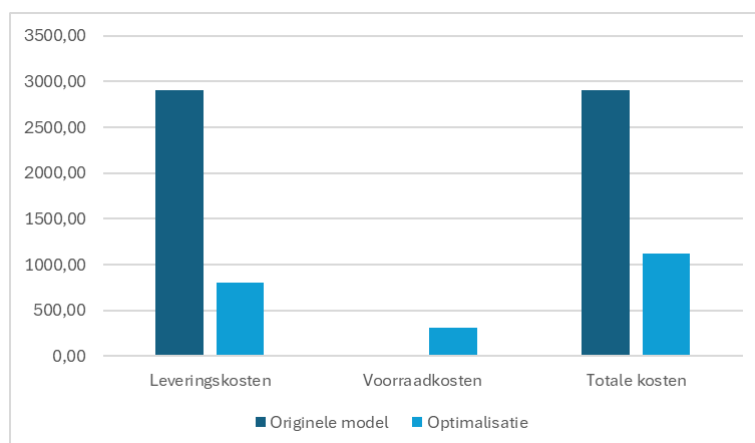
#### 5.3.1 Configuratie met tien retailers

Als eerste komt de configuratie met tien retailers aan bod. Hier zullen de geoptimaliseerde statistieken voor deze configuratie vergeleken worden met die van het originele model. Op basis hiervan kunnen analyses worden gemaakt van het effect van de optimalisatie in het eerste echelon voor deze configuratie.

|                        | Originele model | Optimalisatie | Vershil in % |
|------------------------|-----------------|---------------|--------------|
| <b>Leveringskosten</b> | €2903,08        | €804,80       | -72,28%      |
| <b>Voorraadkosten</b>  | €0,00           | €311,19       | /            |
| <b>Totale kosten</b>   | €2903,08        | €1115,99      | -61,56%      |

Tabel 5: Kosten 10 retailers

Allereerst worden de kostenelementen met elkaar vergeleken in Tabel 5. Aangezien er in het originele model geen opslag mogelijk is in het SCC, bestaat de totale kost er uitsluitend uit de leveringskosten. Deze leveringskosten zijn in het geoptimaliseerde model 72,28 procent lager als gevolg van een verbeterde leveringsplanning en het gebruik van voorraad in het SCC. De kosten van deze voorraad in het SCC bedragen 311,19 euro en gecombineerd met de leveringskosten in de geoptimaliseerde situatie, zijn de totale kosten 61,56 procent lager dan in het originele model. Dit maakt dat de optimalisatie op het vlak van kosten aanzienlijke verschillen teweegbrengt. Deze kostenvergelijking wordt grafisch weergegeven in Figuur 9. Ter illustratie van de verschillen tussen de instanties onderling voor de optimalisatie, de minimum totale kost bedroeg 765,19 euro en de maximum totale kost was 1379,94 euro, wat een verschil betekent van 614,75 euro.



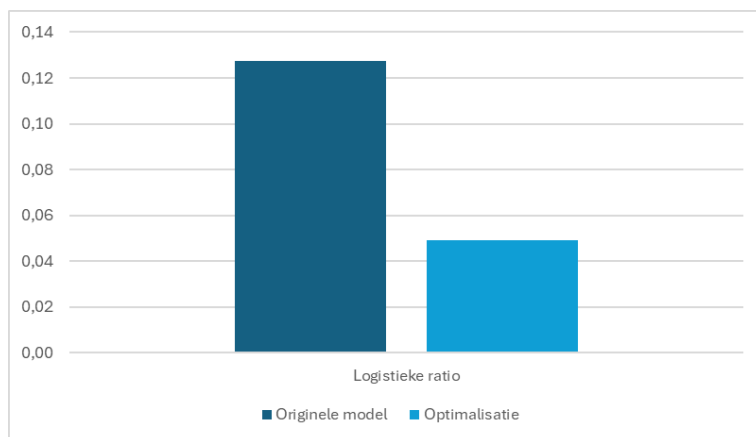
Figuur 9: Vergelijking kosten 10 retailers

|                         | Originele model | Optimalisatie | Vershil in % |
|-------------------------|-----------------|---------------|--------------|
| <b>Logistieke ratio</b> | 0,13            | 0,05          | -61,47%      |

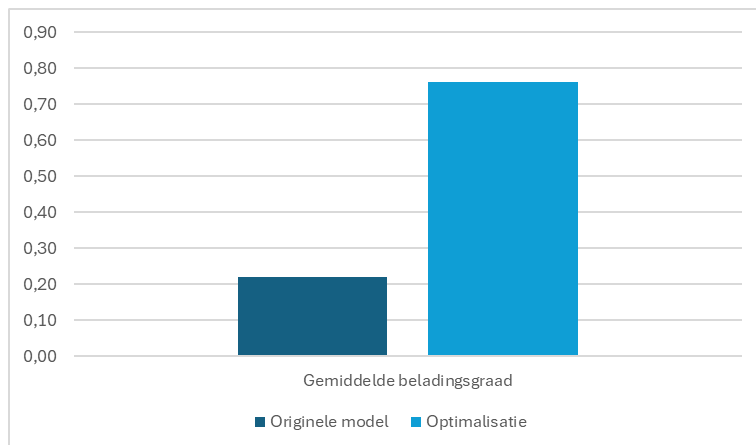
|                                  |       |       |         |
|----------------------------------|-------|-------|---------|
| <b>Gemiddelde beladingsgraad</b> | 0,22  | 0,76  | 54,27%  |
| <b>Aantal trips</b>              | 52,60 | 15,30 | -70,91% |

Tabel 6: Statistieken 10 retailers

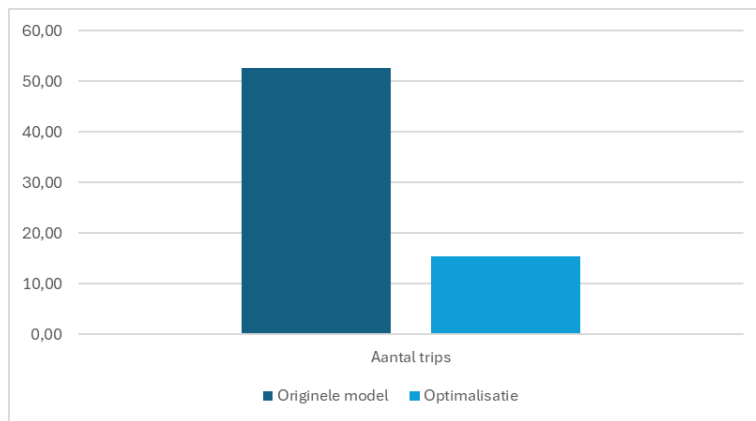
Betreffende de overige statistieken, kan uit Tabel 6 vastgesteld worden dat deze allemaal verbeterd zijn. De logistieke ratio, zijnde de gemiddelde kost om één eenheid product te distribueren, is gedaald met 61,47 procent, net als het aantal trips dat met 70,91 procent is verminderd. Bovendien is de gemiddelde beladingsgraad van de bestelwagens met een capaciteit van 2000 eenheden aanzienlijk gestegen met 54,27 procent, van slechts een kwart gevuld naar meer dan driekwart gevuld. Ook hier is de impact van de opslagmogelijkheid in het SCC duidelijk, er kunnen namelijk meer producten tegelijkertijd aan het SCC geleverd worden, vermits ze er opgeslagen kunnen worden. Dit leidt tot een hogere beladingsgraad en een lager aantal trips. Deze statistieken zijn tevens gevisualiseerd in figuren 10, 11 en 12.



Figuur 10: Vergelijking logistieke ratio 10 retailers



Figuur 11: Vergelijking gemiddelde beladingsgraad 10 retailers



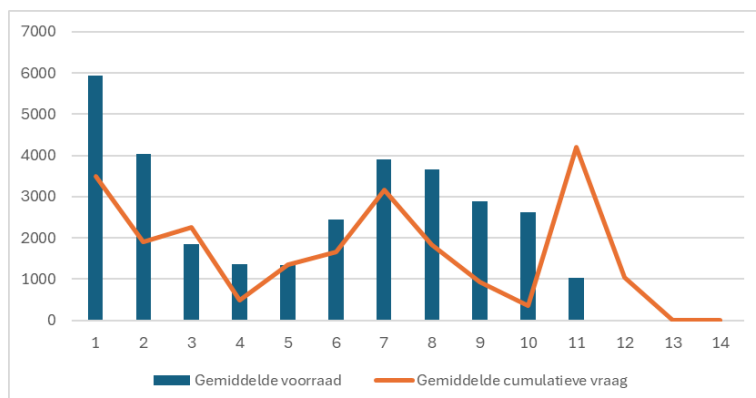
Figuur 12: Vergelijking aantal trips 10 retailers

|                            | Gemiddelde    | Maximum       |
|----------------------------|---------------|---------------|
| <b>Voorraad SCC</b>        | 2223 eenheden | 5944 eenheden |
| <b>Bezettingsgraad SCC</b> | 24,70%        | 66,05%        |

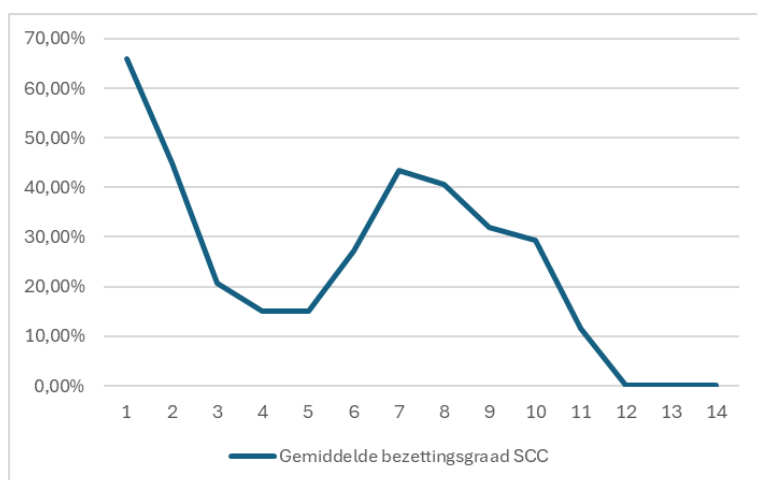
Tabel 7: Voorraad SCC 10 retailers

Ten slotte wordt de voorraad in het SCC nader onderzocht in Tabel 7. Deze bedroeg gemiddeld 2223 eenheden gedurende de veertien periodes, met een maximum van 5944 eenheden. In vergelijking met de opslagcapaciteit van 9000 eenheden is dit laag, gemiddeld had het SCC slechts een bezettingsgraad van ongeveer 25 procent met een maximum van 66,05 procent. Het lage gemiddelde kan deels verklaard worden door het feit dat er gedurende de laatste drie periodes geen producten meer opgeslagen werden in het SCC. Dit komt doordat er in alle tien instanties de laatste twee periodes geen vraag meer was naar de zes producten. Indien deze drie periodes buiten beschouwing gelaten worden, blijft de bezettingsgraad van het SCC echter nog steeds ruim onvoldoende, namelijk 31,43 procent. Hieruit kan afgeleid worden dat de opslagcapaciteit van 9000 eenheden onevenredig groot is in vergelijking met de werkelijke benutting ervan voor de configuratie met tien retailers.

De evolutie van de voorraad in het SCC is samen met de gemiddelde cumulatieve vraag naar alle zes de producten weergegeven in Figuur 13, terwijl de bezettingsgraad van het SCC wordt getoond in Figuur 14. Hieruit kan afgeleid worden dat de voorraad in het SCC het vraagpatroon volgt. In de eerste twee periodes is er het meeste voorraad aanwezig in het SCC, wat wordt weerspiegeld in de bezettingsgraad. Deze bereikt een piek in de eerste periode en ligt, op de eerste twee periodes na, constant onder de 50 procent, ondanks een tweede piek in periode zeven van 43,41 procent.



*Figuur 13: Vergelijking voorraad en cumulatieve vraag 10 retailers*



*Figuur 14: Gemiddelde bezettingsgraad SCC 10 retailers*

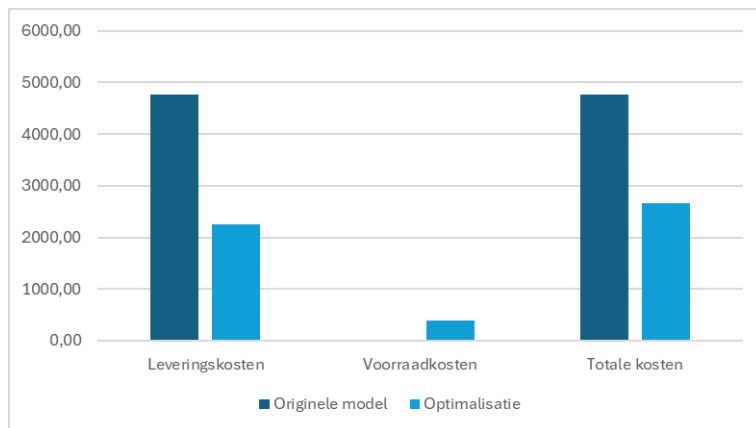
### 5.3.2 Configuratie met dertig retailers

In deze sectie wordt de configuratie met dertig retailers behandeld. De geoptimaliseerde statistieken voor deze configuratie worden vergeleken met die van het originele model om het effect van het optimalisatiemodel in deze situatie te analyseren.

|                        | Originele model | Optimalisatie | Verschil in % |
|------------------------|-----------------|---------------|---------------|
| <b>Leveringskosten</b> | €4765,57        | €2260,36      | -52,57%       |
| <b>Voorraadkosten</b>  | €0,00           | €391,62       | /             |
| <b>Totale kosten</b>   | €4765,57        | €2651,98      | -44,35%       |

*Tabel 8: Kosten 30 retailers*

Voor de configuratie met dertig retailers zijn de kostenelementen eveneens met elkaar vergeleken in Tabel 8. Hier zijn in het geoptimaliseerde model de leveringskosten 52,57 procent lager vergeleken met het originele model. De voorraadkosten in het SCC bedragen 391,62 euro. De totale kosten zijn in deze configuratie 44,35 procent lager dan de leveringskosten in het originele model. Dit toont aan dat de optimalisatie ook in deze setting op het vlak van kosten aanzienlijke besparingen realiseert. Deze kostenvergelijking wordt grafisch weergegeven in Figuur 15. Het verschil tussen de instanties onderling voor de optimalisatie bedroeg voor deze configuratie maximaal 559,15 euro wat betreft de totale kosten, met een minimum van 2309,29 euro en een maximum van 2868,44 euro. Dit verschil is bijgevolg kleiner dan bij de configuratie met tien retailers.

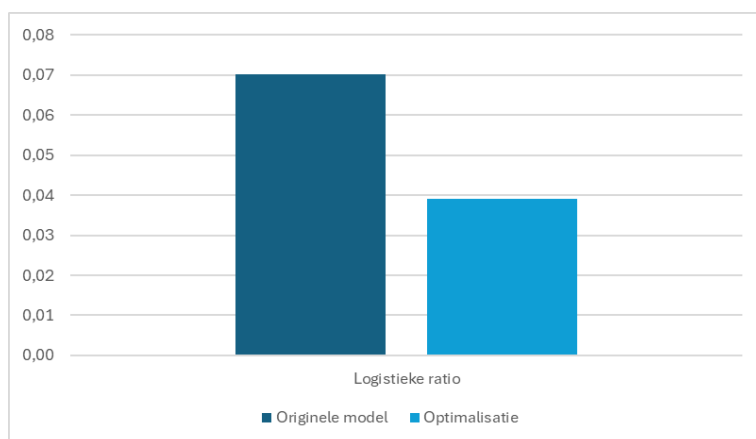


*Figuur 15: Vergelijking kosten 30 retailers*

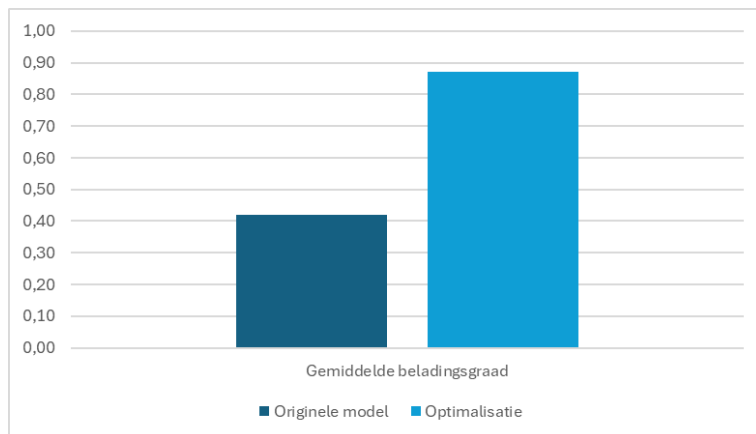
|                                  | Originele model | Optimalisatie | Vershil in % |
|----------------------------------|-----------------|---------------|--------------|
| <b>Logistieke ratio</b>          | 0,07            | 0,04          | -44,43%      |
| <b>Gemiddelde beladingsgraad</b> | 0,42            | 0,87          | 45,27%       |
| <b>Aantal trips</b>              | 81,40           | 39,30         | -51,72%      |

*Tabel 9: Statistieken 30 retailers*

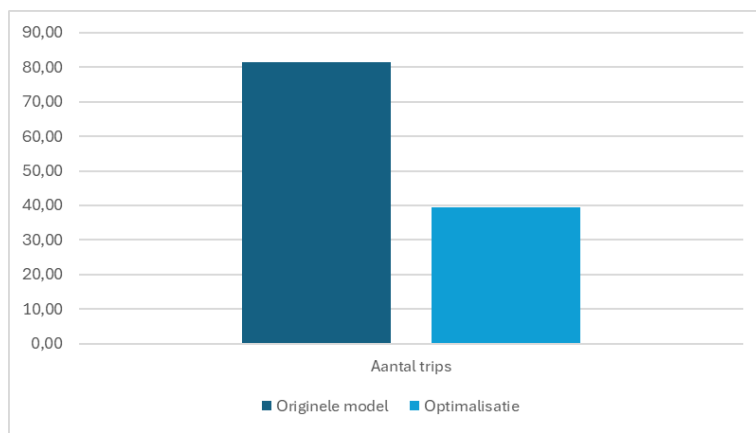
De vergelijking tussen de waarden van de overige statistieken is weergegeven in Tabel 9. Ook hier kan vastgesteld worden dat deze statistieken aanzienlijk verbeterd zijn in het geoptimaliseerde model. Zo zijn de logistieke ratio en het aantal trips gedaald met respectievelijk 44,43 en 51,72 procent. Tevens is de gemiddelde beladingsgraad van de bestelwagens toegenomen met 45,27 procent naar 87 procent, wat betekent dat de bestelwagens gemiddeld voor bijna 90 procent gevuld zijn. Deze verbeteringen kunnen, net als in de configuratie met tien retailers, toegeschreven worden aan de opslagmogelijkheden in het SCC, die zowel de beladingsgraad hebben verhoogd als het aantal trips hebben verminderd. Deze statistieken zijn gevisualiseerd in figuren 16, 17 en 18.



*Figuur 16: Vergelijking logistieke ratio 30 retailers*



Figuur 17: Vergelijking gemiddelde beladingsgraad 30 retailers



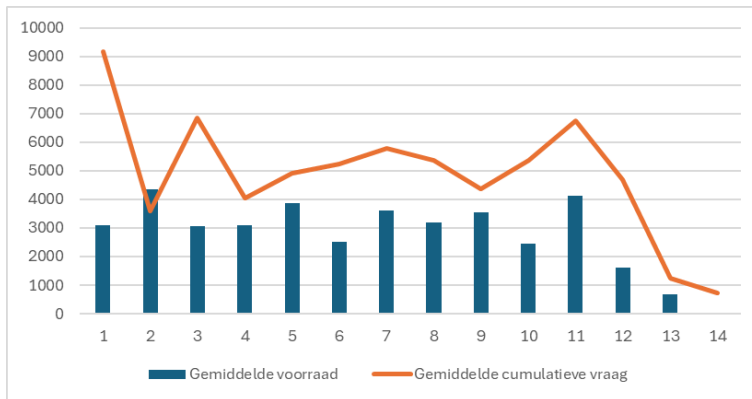
Figuur 18: Vergelijking aantal trips 30 retailers

|                            | Gemiddelde    | Maximum       |
|----------------------------|---------------|---------------|
| <b>Voorraad SCC</b>        | 2797 eenheden | 4347 eenheden |
| <b>Bezettingsgraad SCC</b> | 31,08%        | 48,30%        |

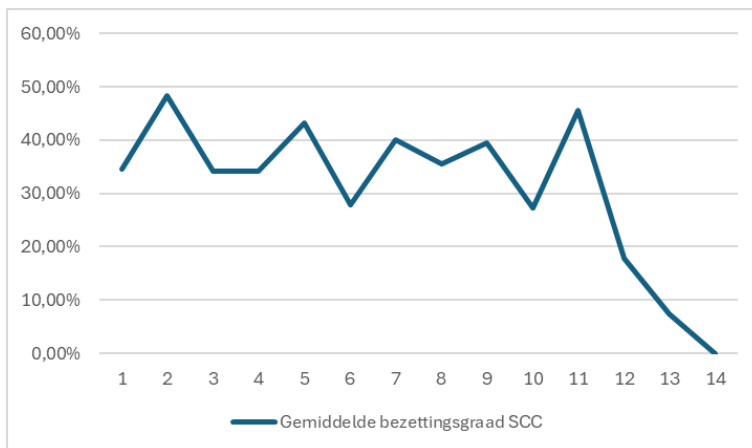
Tabel 10: Voorraad SCC 30 retailers

Ten slotte wordt de voorraad in het SCC nader onderzocht voor de configuratie met dertig retailers in Tabel 10. Deze bedroeg gemiddeld 2797 eenheden gedurende de veertien periodes, met een piek van 4347 eenheden. Ook in deze configuratie is dit in vergelijking met de opslagcapaciteit van 9000 eenheden laag, gemiddeld had het SCC slechts een bezettingsgraad van 31,08 procent met een maximum van 48,30 procent. In deze configuratie was er elke periode vraag naar ten minste één van de zes producten, waardoor er enkel in de laatste periode geen voorraad meer aanwezig was in het SCC. De opslagcapaciteit van 9000 eenheden is bijgevolg ook in deze configuratie met dertig retailers buitenproportioneel groot gebleken in vergelijking met het werkelijke gebruik ervan.

De evolutie van de voorraad in het SCC is samen met de gemiddelde cumulatieve vraag naar alle zes de producten weergegeven in Figuur 19, terwijl de bezettingsgraad van het SCC wordt getoond in Figuur 20. In beide figuren is zichtbaar dat het verloop van de voorraad grotendeels de vraag volgt, zonder grote fluctuaties. In het algemeen situeert de bezettingsgraad zich tussen de 30 en 50 procent, met uitzondering van de laatste drie periodes waarin deze lager wordt.



Figuur 19: Vergelijking voorraad en cumulatieve vraag 30 retailers



Figuur 20: Gemiddelde bezettingsgraad SCC 30 retailers

### 5.3.3 Vergelijking tussen configuraties

Deze sectie vergelijkt het verschil tussen het originele model en de optimalisatie in beide configuraties, alsook beide optimalisaties ten opzichte van elkaar. De nadruk ligt hier voornamelijk op de vergelijking tussen beide configuraties, vermits de vergelijking met het originele model reeds uitgevoerd is in de eerdere secties. Er zal onderzocht worden welke statistieken het meest beïnvloed worden door het aantal retailers. Hierbij wordt zoals beschreven in de opzet van de experimenten (Sectie 5.2) gebruik gemaakt van de kosten en het aantal trips per afleverpunt, waarbij deze worden gedeeld door het aantal retailers maal het aantal leveranciers, om een eerlijke vergelijking te kunnen maken tussen de verschillende probleemgroottes.

|                                        | Configuratie | Vershil met origineel in % |
|----------------------------------------|--------------|----------------------------|
| <b>Leveringskosten per afleverpunt</b> | 10 retailers | -72,28%                    |
|                                        | 30 retailers | -52,57%                    |
| <b>Totale kosten per afleverpunt</b>   | 10 retailers | -61,56%                    |
|                                        | 30 retailers | -44,35%                    |
| <b>Aantal trips per afleverpunt</b>    | 10 retailers | -70,91%                    |
|                                        | 30 retailers | -51,72%                    |
| <b>Logistieke ratio</b>                | 10 retailers | -61,47%                    |
|                                        | 30 retailers | -44,43%                    |

|                                  |              |        |
|----------------------------------|--------------|--------|
| <b>Gemiddelde beladingsgraad</b> | 10 retailers | 54,27% |
|                                  | 30 retailers | 45,27% |

Tabel 11: Vergelijking statistieken verschil met origineel 10 en 30 retailers

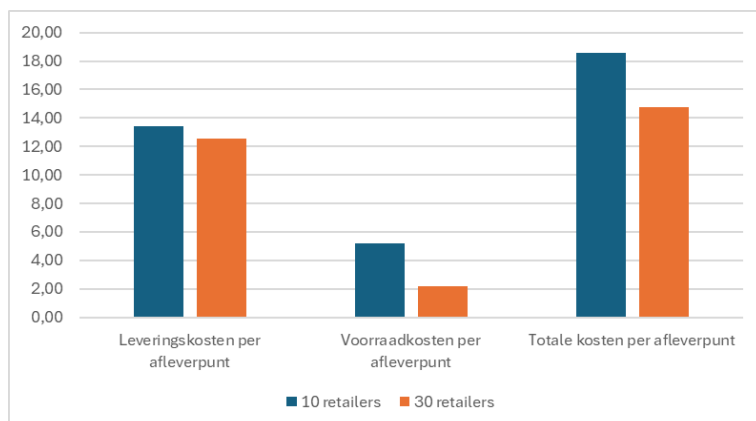
In Tabel 11 is de vergelijking met het originele model voor alle statistieken in beide configuraties weergegeven. Hierin is zichtbaar dat het verschil met het originele model voor zowel de leveringskosten als totale kosten bijna twintig procent groter is in de configuratie met tien retailers, wel wordt het verschil tussen beide configuraties kleiner bij de totale kosten. Ook voor de overige statistieken is het verschil tussen het origineel en de optimalisatie groter in de configuratie met tien retailers. De verbeteringen in de gemiddelde beladingsgraad liggen het dichtst bij elkaar. Deze resultaten suggereren dat het verschil met het originele model kleiner wordt wanneer er 20 extra retailers aanwezig zijn.

Het vervolg van dit onderdeel zal de optimalisaties van beide configuraties met elkaar vergelijken voor de verschillende statistieken.

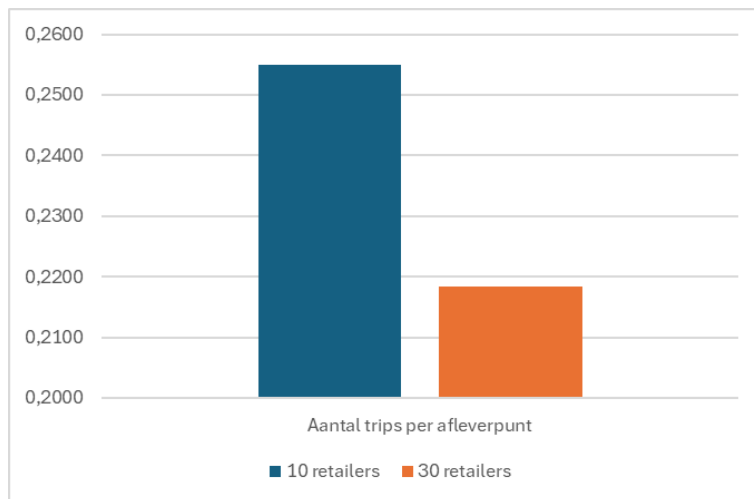
|                        | <b>10 retailers</b> | <b>30 retailers</b> | <b>Vershil in %</b> |
|------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| <b>Leveringskosten</b> | €13,41              | €12,56              | -6,38%              |
| <b>Voorraadkosten</b>  | €5,19               | €2,18               | -58,05%             |
| <b>Totale kosten</b>   | €18,60              | €14,73              | -20,79%             |
| <b>Aantal trips</b>    | 0,2550              | 0,2183              | -14,38%             |

Tabel 12: Vergelijking statistieken per afleverpunt 10 en 30 retailers

In Tabel 12 wordt er dieper ingegaan op de verschillen tussen beide optimalisaties. Zoals eerder vermeld, maakt het werken met statistieken per afleverpunt het mogelijk om het effect van de verhoogde productvraag in de configuratie met dertig retailers weg te filteren. Zowel de leverings- als voorraadkosten vertonen in deze statistieken een gunstiger beeld voor de configuratie met dertig retailers, wat resulteert in een totale kost per afleverpunt die 20,79 procent lager is dan in de configuratie met tien retailers. Met name het opmerkelijk grote verschil in voorraadkosten per afleverpunt, die maar liefst 58,05 procent lager zijn, suggereert dat het aantal retailers een aanzienlijke impact heeft op deze parameter. Het aantal trips per afleverpunt is tot slot ook met 14,38 procent verlaagd in de optimalisatie met dertig retailers. Deze vier statistieken per afleverpunt zijn tevens met elkaar vergeleken voor beide configuraties in figuren 21 en 22.



Figuur 21: Vergelijking kosten per afleverpunt 10 en 30 retailers

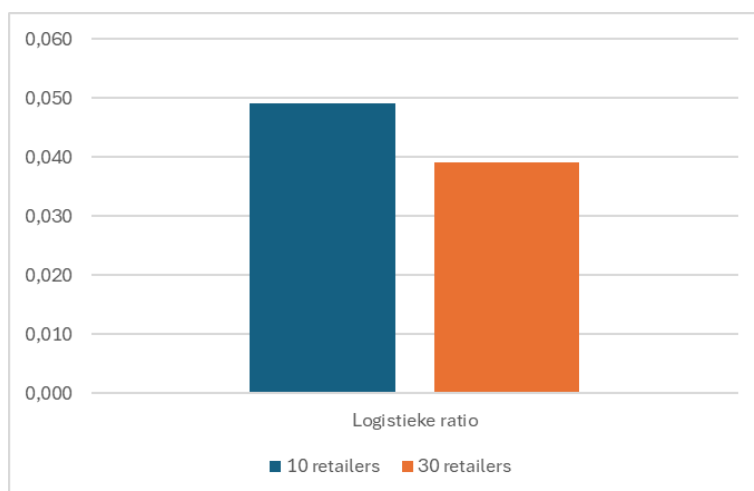


Figuur 22: Vergelijking aantal trips per afleverpunt 10 en 30 retailers

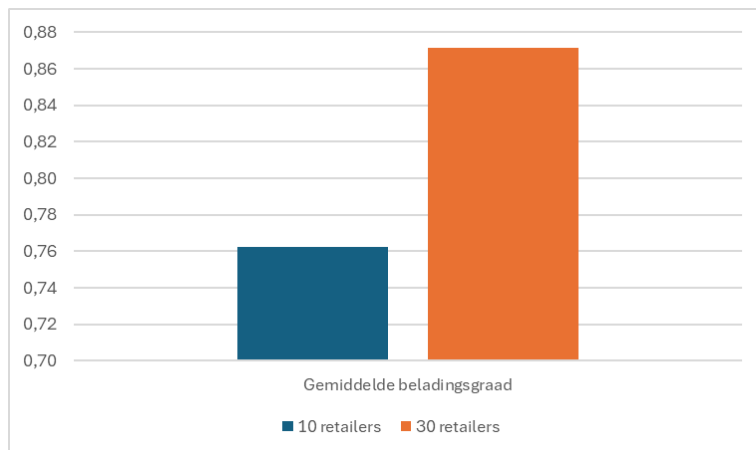
|                                  | 10 retailers | 30 retailers | Vershil in % |
|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>Logistieke ratio</b>          | 0,049        | 0,039        | -20,56%      |
| <b>Gemiddelde beladingsgraad</b> | 0,76         | 0,87         | 10,91%       |

Tabel 13: Vergelijking statistieken 10 en 30 retailers

Tabel 13 geeft de statistieken weer die niet per afleverpunt berekend zijn, namelijk de logistieke ratio en de gemiddelde beladingsgraad van de bestelwagens. Logischerwijs is deze beladingsgraad gestegen in de configuratie met dertig retailers ten opzichte van die met 10 retailers vanwege de grotere vraag naar producten. Opvallend is echter dat deze stijging slechts 10,91 procent bedraagt, ondanks een verdrievoudiging van het aantal retailers. Dit toont aan dat het verhogen van het aantal retailers van tien naar dertig leidt tot meer consolidatiemogelijkheden bij het SCC. De gemiddelde kost voor het distribueren van één eenheid product, zijnde de logistieke ratio, daalt tevens fors met 20,56 procent naar 0.039 euro, vanwege een efficiëntere verdeling van meer producten. Hieruit blijkt dat het aantal retailers eveneens een aanzienlijke invloed heeft op de logistieke ratio. Beide statistieken zijn gevisualiseerd in figuren 23 en 24.



Figuur 23: Vergelijking logistieke ratio 10 en 30 retailers

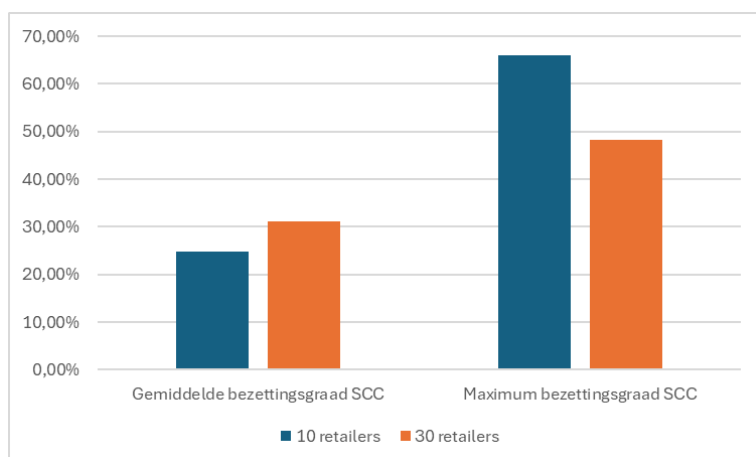


*Figuur 24: Vergelijking gemiddelde beladingsgraad 10 en 30 retailers*

|                                       | 10 retailers | 30 retailers |
|---------------------------------------|--------------|--------------|
| <b>Gemiddelde bezettingsgraad SCC</b> | 24,70%       | 31,08%       |
| <b>Maximum bezettingsgraad SCC</b>    | 66,05%       | 48,30%       |

*Tabel 14: Vergelijking bezettingsgraad 10 en 30 retailers*

Tot slot volgt een vergelijking van de bezettingsgraad van het SCC voor beide optimalisaties in Tabel 14. Ook hier is deze logischerwijs hoger in de configuratie met dertig retailers vanwege de hogere productvraag en het feit dat er in iedere periode een vraag is naar minstens één van de zes producten, al bedraagt het verschil slechts 6,38 procent. Opvallender is echter een omgekeerd patroon bij de maximale bezettingsgraad, hier is deze in de configuratie met tien retailers bijna twintig procent hoger dan in die met dertig retailers. Zoals eerder vermeld in beide secties over de individuele configuraties, is de gemiddelde bezettingsgraad veruit onvoldoende om de capaciteit van 9000 eenheden te benaderen. De bezettingsgraad is visueel vergeleken voor beide optimalisaties in Figuur 25.



*Figuur 25: Vergelijking bezettingsgraad SCC 10 en 30 retailers*

#### 5.3.4 Scenario met SCC-capaciteit van 3000 eenheden

Vermits voor beide configuraties geconcludeerd kon worden dat de gemiddelde voorraad in het SCC met een opslagcapaciteit van 9000 eenheden ruim onvoldoende is om dit naar behoren te vullen,

wordt in deze sectie een aanpassing doorgevoerd aan deze opslagcapaciteit om het inefficiënte ruimtegebruik tegen te gaan.

Dit wordt gedaan om te voorkomen dat de geboekte efficiëntiewinsten door de optimalisatie, zowel financieel als logistiek, teniet worden gedaan door een te lage bezetting van het SCC, hetgeen de financiële levensvatbaarheid ervan potentieel in het gedrang kan brengen. Zoals in de literatuurstudie in sectie 2.2.3 is gebleken, staan SCC's namelijk erom bekend duur te zijn om te exploiteren door onder meer hoge operationele kosten voor het beheer ervan. Sommige van deze operationele kosten blijven constant, ongeacht de bezettingsgraad van het SCC, zoals huur-, elektriciteits- en onderhoudskosten. Dit betekent dat wanneer een SCC grotendeels leeg staat, deze vaste kosten worden verdeeld over een kleinere hoeveelheid opgeslagen goederen, wat resulteert in hogere kosten per eenheid. Daarnaast kan een bijkomend argument zijn dat het in stedelijke omgevingen mogelijks een uitdaging is om een opslagcapaciteit te voorzien die tien keer zo groot is als die van de retailers. (Björklund & Johansson, 2018; Browne et al., 2005; Janjevic & Ndiaye, 2017; Johansson & Björklund, 2017; Lin et al., 2016)

Hierdoor is besloten om de opslagcapaciteit in het SCC op basis van de geoptimaliseerde data, met een gemiddelde voorraad in het SCC van respectievelijk 2223 eenheden voor de configuratie met tien retailers en 2797 eenheden voor de configuratie met dertig retailers, terug te brengen tot 3000 eenheden. Dit betekent nog steeds meer dan een verdrievoudiging ten opzichte van de opslagcapaciteit van 900 eenheden van de retailers. Het doel hiervan is de bezetting van het SCC aanzienlijk te verhogen om dit rendabeler te maken en onderbezetting zoveel mogelijk te vermijden.

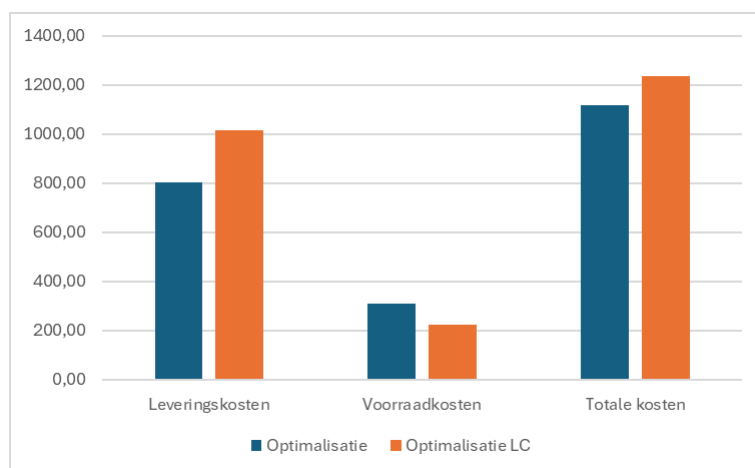
In het verdere verloop van deze sectie zal een vergelijking worden gemaakt tussen de nieuwe optimalisatie met de lagere opslagcapaciteit en de vorige optimalisatie, zowel voor de twee configuraties afzonderlijk als tussen beide configuraties onderling. De afkorting LC (= Lagere Capaciteit) zal worden gebruikt om naar dit nieuwe scenario te verwijzen. Het originele model zal niet opgenomen worden in deze vergelijking voor het nieuwe scenario, vermits reeds vaststaat dat het optimalisatiemodel consequent de betere keuze is.

|                                      | <b>Configuratie</b> | <b>Optimalisatie</b> | <b>Optimalisatie<br/>LC</b> | <b>Verskil in<br/>%</b> |
|--------------------------------------|---------------------|----------------------|-----------------------------|-------------------------|
| <b>Leveringskosten</b>               | 10 retailers        | €804,80              | €1014,08                    | 26,00%                  |
|                                      | 30 retailers        | €2260,36             | €2493,22                    | 10,30%                  |
| <b>Voorraadkosten</b>                | 10 retailers        | €311,19              | €222,49                     | -28,50%                 |
|                                      | 30 retailers        | €391,62              | €274,49                     | -29,91%                 |
| <b>Totale kosten</b>                 | 10 retailers        | €1115,99             | €1236,57                    | 10,80%                  |
|                                      | 30 retailers        | €2651,98             | €2767,71                    | 4,36%                   |
| <b>Logistieke ratio</b>              | 10 retailers        | 0,049                | 0,054                       | 10,82%                  |
|                                      | 30 retailers        | 0,039                | 0,041                       | 4,35%                   |
| <b>Gemiddelde<br/>beladingsgraad</b> | 10 retailers        | 0,76                 | 0,61                        | -15,59%                 |
|                                      | 30 retailers        | 0,87                 | 0,78                        | -9,16%                  |
| <b>Aantal trips</b>                  | 10 retailers        | 15,30                | 19,50                       | 27,45%                  |
|                                      | 30 retailers        | 39,30                | 44,30                       | 12,72%                  |

*Tabel 15: Vergelijking statistieken optimalisatie LC 10 en 30 retailers*

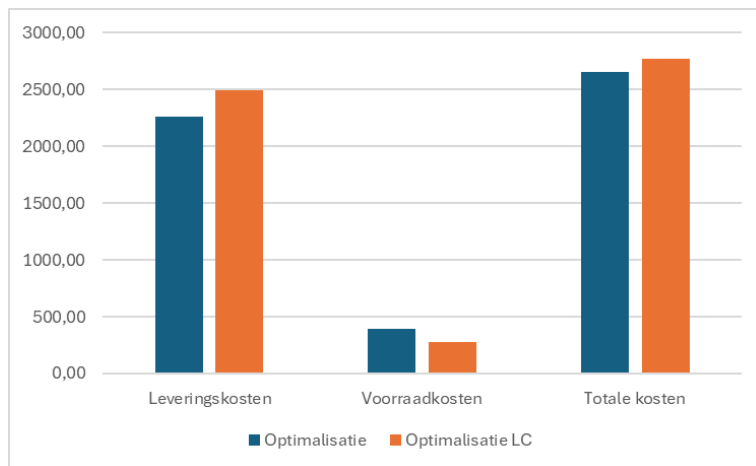
Aangezien beide configuraties niet afzonderlijk worden behandeld, geeft de bovenstaande Tabel 15 een overzicht van de geoptimaliseerde waarden en het procentuele verschil tussen beide scenario's voor alle statistieken, voor zowel de configuratie met tien retailers als die met dertig retailers. De nadruk zal hier liggen op de analyse van de procentuele verschillen. Uit de tabel blijkt dat beide configuraties een vergelijkbaar patroon van stijgingen en dalingen vertonen voor de verschillende statistieken, maar dat deze over het algemeen uitgesprokener zijn in de configuratie met tien retailers.

Voor de configuratie met tien retailers resulteert dit in een stijging van de totale kosten met 10,80 procent. Deze toename is te wijten aan een stijging van de leveringskosten met meer dan een kwart, die gemilderd wordt door een afname van de voorraadkosten met 28,50 procent. Deze voorraadkosten wegen echter minder door, waardoor de totale kosten gestegen zijn. Het verschil in kosten tussen beide scenario's voor de configuratie met tien retailers is weergegeven in Figuur 26. Als gevolg van de hogere kosten is ook de logistieke ratio gestegen met om en bij de tien procent. Wat betreft de gemiddelde beladingsgraad van de bestelwagens, deze is 15,59 procent gedaald naar 60 procent. Het gemiddelde aantal trips over de tien instanties heen voor de configuratie met tien retailers is ten slotte aanzienlijk toegenomen met 27,45 procent.



*Figuur 26: Vergelijking kosten LC 10 retailers*

Voor de configuratie met dertig retailers is er tevens een stijging van de totale kosten, hetzij licht, met 4,36 procent. In deze configuratie stijgen de leveringskosten slechts iets meer dan tien procent, terwijl de voorraadkosten met bijna dertig procent dalen. Opnieuw wegen de leveringskosten hier zwaarder door, resulterend in een stijging van de totale kosten en bijgevolg de logistieke ratio met 4,35 procent. Ook voor deze configuratie is de vergelijking tussen de kosten weergegeven in Figuur 27. De gemiddelde beladingsgraad van de bestelwagens bedraagt 78 procent, hetgeen een daling betekent van iets minder dan tien procent ten opzichte van de vorige optimalisatie. Het aantal trips is tot slot gestegen met 12,72 procent.



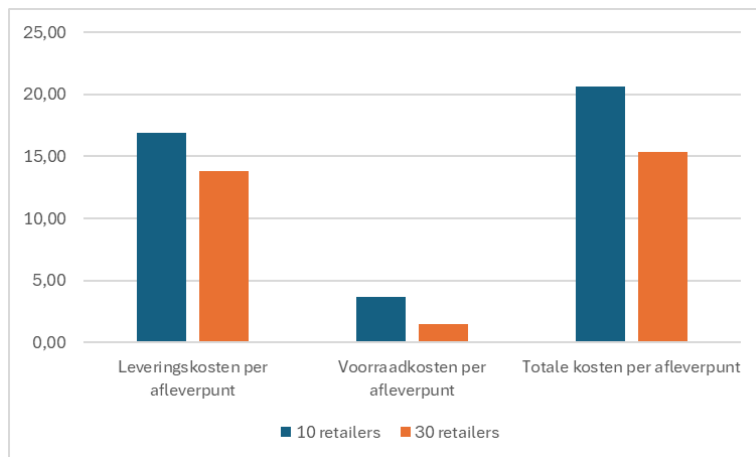
*Figuur 27: Vergelijking kosten LC 30 retailers*

Het vervolg van dit onderdeel zal de optimalisaties met lagere voorraadcapaciteit van beide configuraties met elkaar vergelijken voor de verschillende statistieken. Er wordt onder meer onderzocht of het aantal retailers hetzelfde, even grote, effect heeft op bepaalde statistieken als in het oorspronkelijk scenario.

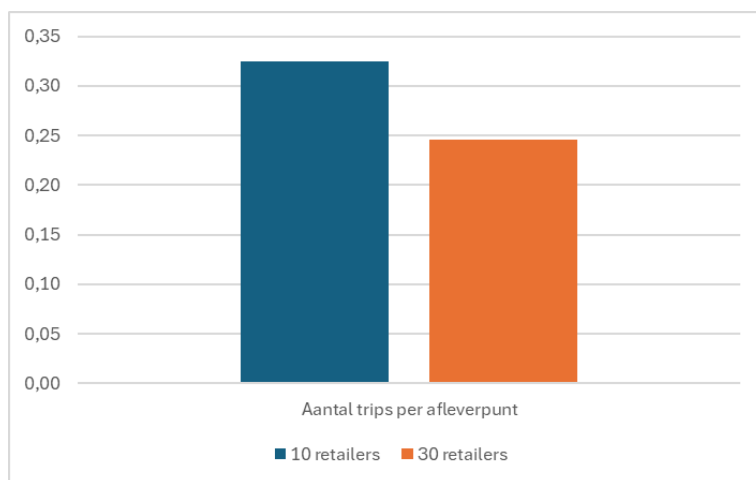
|                        | 10 retailers | 30 retailers | Verschil in % |
|------------------------|--------------|--------------|---------------|
| <b>Leveringskosten</b> | €16,90       | €13,85       | -18,05%       |
| <b>Voorraadkosten</b>  | €3,71        | €1,52        | -58,88%       |
| <b>Totale kosten</b>   | €20,61       | €15,38       | -25,39%       |
| <b>Aantal trips</b>    | 0,33         | 0,25         | -24,27%       |

*Tabel 16: Vergelijking statistieken LC per afleverpunt 10 en 30 retailers*

In Tabel 16 wordt er dieper ingegaan op de verschillen tussen beide optimalisaties. Opnieuw worden hier de statistieken per afleverpunt gebruikt om het effect van de verhoogde productvraag in de configuratie met dertig retailers te neutraliseren. Net als in het vorige scenario vertonen zowel de leverings- als voorraadkosten in deze statistieken een gunstiger beeld voor de configuratie met dertig retailers, met een totale kost per afleverpunt die 25,39 procent lager is dan in de configuratie met tien retailers. Er is een gelijkaardig groot verschil in voorraadkosten als bij het scenario met de voorraadcapaciteit van 9000 eenheden, namelijk 58,88 procent, waarmee het effect van het aantal retailers hierop bevestigd wordt. Interessant genoeg vertoont het nieuwe scenario een significant groter verschil in leveringskosten. Waar dit verschil in het vorige scenario slechts 6,38 procent bedroeg, is het nu 18,05 procent. Dit suggereert dat de impact van de lagere opslagcapaciteit verschillend uitvalt voor beide configuraties. Ook het aantal trips per afleverpunt is aanzienlijk verminderd in de nieuwe optimalisatie met dertig retailers ten opzichte van tien retailers, met een afname van een kwart. Het eerdere verschil hiertussen bedroeg slechts om en bij de vijftien procent in het basisscenario. Deze vier statistieken per afleverpunt zijn tevens met elkaar vergeleken voor beide configuraties in figuren 28 en 29.



*Figuur 28: Vergelijking kosten per afleverpunt LC 10 en 30 retailers*

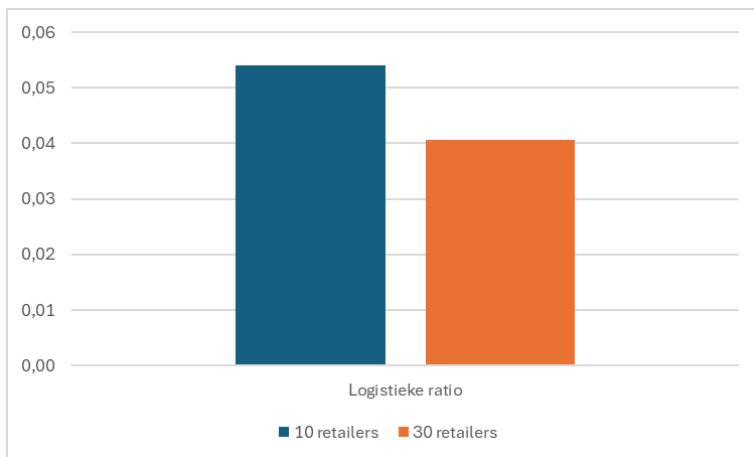


*Figuur 29: Vergelijking aantal trips per afleverpunt LC 10 en 30 retailers*

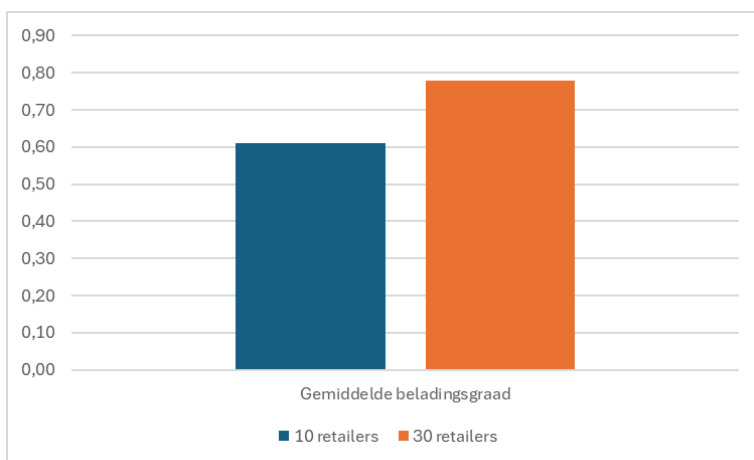
|                                  | 10 retailers | 30 retailers | Vershil in % |
|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>Logistieke ratio</b>          | 0,054        | 0,041        | -25,19%      |
| <b>Gemiddelde beladingsgraad</b> | 0,61         | 0,78         | 17,00%       |

*Tabel 17: Vergelijking statistieken LC 10 en 30 retailers*

Betreffende de vernieuwde geoptimaliseerde logistieke ratio en gemiddelde beladingsgraad van de bestelwagens, deze zijn weergegeven in Tabel 17. De logistieke ratio van de configuratie met dertig retailers is een kwart lager dan bij de configuratie tien retailers, hetgeen een groter verschil is dan in het oorspronkelijke scenario waar het verschil ongeveer twintig procent bedroeg. Ook hier is een verklaring de efficiëntere verdeling van de producten, waardoor het aantal retailers een effect heeft op de logistieke ratio. Wat betreft de gemiddelde beladingsgraad, deze ligt voor de configuratie met dertig retailers 17 procent hoger, met een waarde van 78 procent. Dit verschil tussen beide configuraties is bijna zeven procent groter geworden, hetgeen aantoont dat de opslagcapaciteit van het SCC hier een grote impact op heeft. Beide statistieken zijn gevisualiseerd in figuren 30 en 31.



*Figuur 30: Vergelijking logistieke ratio LC 10 en 30 retailers*



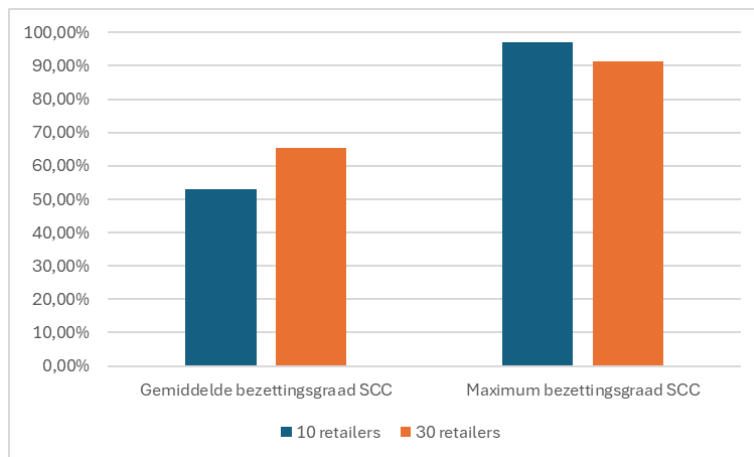
*Figuur 31: Vergelijking gemiddelde beladingsgraad LC 10 en 30 retailers*

|                                       | 10 retailers  | 30 retailers  |
|---------------------------------------|---------------|---------------|
| <b>Gemiddelde voorraad SCC</b>        | 1589 eenheden | 1961 eenheden |
| <b>Gemiddelde bezettingsgraad SCC</b> | 52,97%        | 65,35%        |
| <b>Maximum bezettingsgraad SCC</b>    | 96,96%        | 91,31%        |

*Tabel 18: Vergelijking bezettingsgraad LC 10 en 30 retailers*

In de Tabel 18 wordt ten slotte een vergelijking gemaakt tussen de voorraad en bezettingsgraad van het SCC in de twee configuraties. Logischerwijs is de bezettingsgraad ook in dit scenario hoger in de configuratie met dertig retailers, namelijk 65,35 procent. Voor de configuratie met tien retailers is deze 52,97 procent, wat aantoont dat het SCC in beide gevallen gemiddeld voor meer dan de helft gevuld is. De maximale bezettingsgraad overtreft in beide configuraties de 90 procent. Ook in dit scenario is het opvallend dat de maximale bezettingsgraad hoger is in de configuratie met tien retailers, al bedraagt het verschil hier slechts 5,65 procent.

Deze resultaten bevestigen het succes van het scenario in het vaststellen van een passendere opslagcapaciteit voor het SCC, waarbij een significante verhoging van de bezettingsgraad is bereikt en onderbezetting grotendeels is vermeden. De vergelijking van de bezettingsgraden voor beide optimalisaties is visueel weergegeven in Figuur 32.



*Figuur 32: Vergelijking bezettingsgraad LC SCC 10 en 30 retailers*

## 5.4 Conclusie praktijkonderzoek

In dit praktijkgedeelte van de masterproef is getracht om een probleem gesteld in één onderdeel van de literatuurstudie, namelijk de financiële levensvatbaarheid van SCC's, op te lossen met een variant op een oplossingsmethode hiervoor uit het andere onderdeel van de literatuurstudie, namelijk de twee-echelon modellen. Er werd op basis van een IRP op het tweede echelon, een optimalisatiemodel ontwikkeld om leveringen aan het SCC in het eerste echelon kostenefficiënter te maken.

Uit de resultaten blijkt dat het optimalisatiemodel in alle geteste situaties voordelen biedt in termen van kosten en efficiëntie, aangezien het consistent alle gemeten statistieken en variabelen verbetert vergeleken met het oorspronkelijke model. Integratie en coördinatie door middel van informatie-uitwisseling tussen de verschillende echelons betreffende leveringshoeveelheden en -tijden heeft zich bewezen als een effectieve strategie om de kosten te kunnen verlagen en tegelijkertijd statistieken als de gemiddelde beladingsgraad aanzienlijk te verbeteren.

Er is tevens aangetoond dat het aantal retailers dat door een SCC bevoorraadt wordt, een significante invloed heeft op de variabelen en statistieken. De vergelijking per afleverpunt toonde namelijk aan dat de kosten significant lager zijn bij de configuratie met dertig retailers dan bij de configuratie met tien retailers. Ook voor andere statistieken presteerde de configuratie met dertig retailers consistent beter, met uitzondering van de maximale bezettingsgraad van het SCC. In vergelijking met het originele model daarentegen is het verschil tussen het origineel en de optimalisatie consistent groter in de configuratie met tien retailers. Dit suggereert dat het verschil met het originele model kleiner wordt naarmate er meer retailers aanwezig zijn. Tot slot bleek de gemiddelde bezettingsgraad in beide configuraties ruim onvoldoende om de opslagcapaciteit van 9000 eenheden te kunnen benaderen.

Wat betreft het bepalen van de opslagcapaciteit van het SCC (9000 of 3000 eenheden) moet er bijgevolg een afweging gemaakt worden tussen een aanzienlijk verbeterde bezettingsgraad, die meer dan verdubbeld en leidt tot lagere vaste kosten per eenheid, en de verhoogde totale distributiekosten, die respectievelijk 10,80 en 4,36 procent hoger uitvallen voor de beide configuraties. Het is daarom van belang de opslagcapaciteit van het SCC af te stemmen op basis van informatie over de goederenstromen die er doorheen zullen lopen en de operationele kosten van het SCC. Gezien de

precaire financiële levensvatbaarheid van SCC's en het feit dat de geoptimaliseerde kosten in het scenario met 3000 eenheden opslagcapaciteit nog steeds aanzienlijk lager zijn dan die van het originele model, valt de keuze op basis van de beschikbare informatie in deze scenario's op het scenario met 3000 eenheden. Ook in dit proces speelt de integratie en coördinatie van informatie tussen verschillende partners in de supply chain (leveranciers, SCC en retailers) een belangrijke rol.

## 6 Conclusie

In deze masterproef stond de rol van Stedelijke Consolidatiecentra (SCC's) als tijdelijke opslaglocaties centraal. De noodzaak en praktijkrelevantie van SCC's werden besproken in het kader van de groeiende verstedelijking en de bijbehorende logistieke uitdagingen. Het onderzoek richtte zich specifiek op de integratie van voorraad- en routeringsbeslissingen in stadslogistiek, met als doel de efficiëntie te verbeteren en kosten te reduceren.

De centrale onderzoeksvraag luidde: *"Hoe draagt het rekening houden met voorraad in combinatie met rittenplanning bij aan het reduceren van kosten in een stedelijk distributiesysteem met twee echelons?"*. Om deze vraag te beantwoorden, werden vijf deelvragen geformuleerd die de structuur van het onderzoek bepaalden. Via een literatuurstudie werd een gedetailleerd inzicht verkregen in de huidige stand van zaken op het gebied van voorraadrouteringsproblemen (IRP), twee-echelon rittenplanning- en voorraadmodellen en de operationele en financiële aspecten van SCC's. Daarnaast werd in een praktijkonderzoek een wiskundig model ontwikkeld en toegepast om leveringen aan een SCC met opslagcapaciteit binnen een stedelijk twee-echelon distributiesysteem te optimaliseren.

Op basis van de informatie uit deze onderdelen konden de vijf deelvragen vervolgens worden beantwoord en kunnen conclusies worden geformuleerd over de effectiviteit en haalbaarheid van SCC's bij het verbeteren van de logistieke prestaties en het verminderen van kosten in stedelijke distributiesystemen.

Het antwoord op de eerste deelvraag *"Wat is de huidige stand van zaken van de IRP-literatuur?"* is terug te vinden in sectie 4, waarin het Inventory-Routing Problem (IRP) werd behandeld. De literatuur rond het IRP toont een actief en groeiend, maar nog steeds beperkt onderzoeksgebied. Sinds de introductie door Bell et al. (1983) heeft het IRP zich ontwikkeld binnen de context van Vendor Managed Inventory (VMI), waarbij voorraadbeheer, voertuigrouting en leveringsplanning worden geïntegreerd. Hierdoor is het IRP complexer dan het klassieke voertuigrouteringsprobleem (VRP). Het IRP wordt geclassificeerd als NP-hard, waardoor exacte oplossingen vaak onhaalbaar zijn voor grote problemen. Daarom richten veel studies zich op heuristieken en metaheuristieken voor benaderende oplossingen. Onderzoek naar voorraadaspecten in multi-echelon routeringsproblemen is beperkt, maar recent zijn er varianten ontwikkeld die toepasbaar zijn op twee-echelon netwerken met een SCC. Dit onderzoek staat echter nog in de kinderschoenen. Slechts een beperkt aantal studies richt zich op deze twee-echelon netwerken, waarbij slechts enkele daarvan stedelijke kenmerken in overweging nemen.

De tweede deelvraag *"Wat zijn de voor- en nadelen van SCC's?"* werd beantwoord in sectie 2 over stedelijke consolidatiecentra (SCC's), waar de belangrijkste voor- en nadelen gepresenteerd zijn op basis van een analyse van de literatuur over financiën, diensten met toegevoegde waarde en onderzoeks lacunes rond SCC's. De huidige literatuur over Stedelijke Consolidatiecentra (SCC's) belicht zowel voordelen als aanzienlijke uitdagingen. SCC's kunnen een cruciale rol spelen in de stadslogistiek door een scala aan functies aan te bieden, variërend van opslag tot transportdiensten en voorraadbeheer. De opslagcapaciteit in het SCC kwam in de literatuur minder sterk naar voren, terwijl het in combinatie met voorraadbeheer kan leiden tot voordelen voor de klant. De belangrijkste voordelen van SCC's zijn milieuwinst en sociale voordelen door efficiënter transport, verbeterde

logistieke planning, beter voorraadbeheer bij klanten, optimaler gebruik van beschikbare middelen en de mogelijkheid om diensten met toegevoegde waarde uit te voeren. Bovendien kunnen SCC's bijdragen aan een verschuiving van push- naar pull-logistiek, wat leidt tot betere controle en zichtbaarheid van de supply chain. Daartegenover staan echter ook nadelen. Zo kunnen de opstart- en operationele kosten hoog zijn. SCC's kunnen mede hierdoor leiden tot hogere leveringskosten als gevolg van een extra goederenbehandelingsfase in de toeleveringsketen, wat zowel tijds- als kostennadelen met zich meebrengt. Dit is mede afhankelijk van hoe goed het SCC is geïntegreerd in de toeleveringsketen en de mate waarin alle kosten en baten in overweging worden genomen. Verder is er vaak een gebrek aan regelgeving voor voertuigen die niet in de consolidatieregeling zijn opgenomen en een gebrek aan incentives voor retailers om gebruik te maken van het SCC, wat kan resulteren in een suboptimale integratie en benutting van het SCC.

Gezien de aanzienlijke uitdagingen voor SCC's, zoals beschreven in het antwoord op de vorige deelvraag, is het belangrijk om te begrijpen welke factoren het succes en de financiële levensvatbaarheid van SCC's beïnvloeden. Daarom is de derde deelvraag "*Welke factoren beïnvloeden het succes van SCC's?*" beantwoord in sectie 2.2.5 van deze masterproef. Uit de literatuur en bevindingen blijkt dat SCC's het grootste potentieel op succes hebben wanneer ze voldoen aan één of meer van vijf cruciale criteria. Ten eerste is de beschikbaarheid van financiering essentieel gebleken. Externe steun, zoals overheidssubsidies of investeringen, is vaak noodzakelijk in de opstartfase om de financiële levensvatbaarheid van SCC's te waarborgen. Daarnaast speelt de sterke betrokkenheid van de publieke sector een belangrijke rol. Regelgeving en beleidsmaatregelen, zoals tijdsbeperkingen voor toegang tot winkelgebieden, kunnen het gebruik van SCC's namelijk stimuleren of afdwingen. Verder spelen bestaande logistieke problemen in het te bedienen gebied een grote rol. SCC's zijn vooral effectief in gebieden met ernstige verkeersopstoppingen, beperkte laad- en losmogelijkheden en andere logistieke uitdagingen, zoals historische stadscentra. Een vierde criteria is een spontane, bottom-up druk van potentiële gebruikers. Initiatieven die voortkomen uit lokale gemeenschappen of belangengroepen kunnen het succes van SCC's bevorderen door samenwerking met lokale overheden en logistieke bedrijven mee te stimuleren. Tot slot is het oplossen van logistieke problemen bij locaties met één eigenaar, zoals winkelcentra, een belangrijk succescriteria. Dit geldt vooral voor nieuwe en grote commerciële projecten waar integratie van SCC's vanaf het begin kan bijdragen aan efficiëntere goederenontvangst en ruimteoptimalisatie.

Met de vierde deelvraag "*Hoe worden voorraadbeheer en rittenplanning gemodelleerd in de literatuur met betrekking tot twee-echelon distributienetwerken?*", werd getracht inzicht te krijgen in de methoden waarmee voorraadbeheer en rittenplanning worden gemodelleerd in de literatuur rond twee-echelon distributienetwerken. Hieruit bleek in sectie 3 dat voorraadbeheer en rittenplanning op verschillende manieren worden gemodelleerd in de literatuur, waarbij een nauwkeurige afstemming van de goederenstromen tussen de verschillende echelons essentieel is. Dit is van groot belang voor de efficiëntie, kostenbeheersing en duurzaamheid van stedelijke toeleveringsketens. Twee-echelon voertuigrouteringsproblemen (2E-VRP) en twee-echelon voorraadsystemen spelen hierbij een centrale rol. Het 2E-VRP modelleert de distributie in een twee-echelon netwerk met stedelijke consolidatiecentra (SCC's), waarbij zowel de primaire routes (eerste echelon) als de secundaire routes (tweede echelon) moeten worden geoptimaliseerd. Het doel is om de transport- en goederenbehandelingskosten te minimaliseren terwijl aan de vraag van de retailers wordt voldaan.

Exacte oplossingen voor het 2E-VRP maken gebruik van complexe algoritmen zoals branch-and-cut, maar vanwege de rekenkundige uitdagingen bij middelgrote tot grote problemen, worden vaak heuristische zoals variable neighborhood search en genetic algorithms toegepast voor benaderende oplossingen.

Naast rittenplanning speelt zoals eerder vermeld ook voorraadbeheer een cruciale rol in twee-echelon netwerken. Twee-echelon voorraadsystemen coördineren de voorraadniveaus van beide echelons om tevens zowel de totale kosten te minimaliseren als aan de vraag te voldoen. De voorraden bij het SCC worden hier gebruikt om periodiek de voorraad bij de klant aan te vullen. Het beheer van deze voorraden vereist een delicate balans: hoge voorraadniveaus verhogen de reactievermogens, maar brengen ook hogere kosten met zich mee. Er wordt continu gezocht naar betere coördinatie en optimalisatie van voorraden om de efficiëntie en duurzaamheid van de supply chain te verbeteren. Deze voorraadsystemen, oorspronkelijk ontwikkeld voor wereldwijde toeleveringsketens, zijn ook effectief toepasbaar in stedelijke netwerken met SCC's, waar extra opslagcapaciteit in het SCC een potentieel belangrijke rol kan spelen.

De vijfde deelvraag heeft betrekking op het praktijkonderzoek in sectie 5 en luidt *"Wat is het effect van het optimaliseren van leveringen aan een SCC op de totale voorraad- en transportkosten in het eerste echelon van een stedelijk distributiesysteem met twee echelons?"*. De modellen uit de literatuurstudie komen samen in het praktijkonderzoek door de integratie van een bestaand IRP-model op het tweede echelon, tussen een SCC en retailers, en een ontwikkeld optimalisatiemodel voor leveringen aan het SCC op het eerste echelon. Deze geïntegreerde aanpak houdt rekening met voorraadniveaus op verschillende manieren: de voorraad bij retailers voor het maken van leveringsbeslissingen met het IRP-model en de voorraad in het SCC als buffer om de financiële levensvatbaarheid ervan te verbeteren. De literatuur, zoals beschreven in de onderdelen over het SCC (Sectie 2), twee-echelon netwerken (Sectie 3) en het IRP (Sectie 4), benadrukt namelijk dat de coördinatie van leveringen en voorraad cruciaal is voor de financiële levensvatbaarheid van een SCC. Op deze manier kunnen niet alleen de totale kosten in het distributiesysteem worden verlaagd, maar kan ook het gebruik van beschikbare ruimte en middelen worden geoptimaliseerd.

De resultaten van het praktijkonderzoek tonen aan dat het optimaliseren van leveringen aan een SCC in een twee-echelon distributiesysteem significante kostenbesparingen oplevert in het eerste echelon. Het ontwikkelde optimalisatiemodel toont aan dat ondanks de toevoeging van voorraadkosten in het SCC, de totale kosten voor het eerste echelon lager liggen dan in een scenario zonder optimalisatie en voorraad in het SCC. Het model biedt in alle geteste situaties voordelen, met naast lagere kosten ook verbeterde beladingsgraden. Deze resultaten benadrukken het belang van een effectieve uitwisseling van (leverings-)informatie tussen de echelons om distributiekosten te verlagen en operationele efficiëntie te verhogen, waardoor de financiële levensvatbaarheid van SCC's kan worden verbeterd. Belangrijk hierbij is een nauwkeurige afstemming van de opslagcapaciteit van het SCC, waarbij een balans moet worden gevonden tussen een verbeterde bezettingsgraad van het SCC en verlaagde totale distributiekosten. De integratie en coördinatie van informatie tussen leveranciers, SCC en retailers blijven daarom cruciale factoren voor het succes en de kostenefficiëntie van het gehele twee-echelon distributiesysteem.

## 7 Beperkingen en toekomstig onderzoek

### 7.1 Beperkingen

In dit laatste onderdeel van de masterproef worden de beperkingen van het onderzoek geformuleerd en tevens enkele aanbevelingen gedaan voor toekomstig onderzoek.

Allereerst zijn er slechts twee configuraties onderzocht met steeds lage voorraadkosten bij de retailers en een vast aantal van zes leveranciers. Hierdoor bleef het verschil tussen de voorraadkosten bij het SCC en bij de retailers relatief klein. De rol die deze verhouding tussen de voorraadkosten bij de retailers en het SCC mogelijk speelt is niet verder onderzocht. Indien er bijvoorbeeld gewerkt zou worden met hoge voorraadkosten bij de retailers zouden deze kosten zijn vertienvoudigd, wat mogelijk een invloed zou hebben gehad op de resultaten en het voorraadgebruik bij het SCC. Bovendien is het aantal leveranciers en retailers relatief beperkt gebleven tot respectievelijk zes leveranciers en tien of dertig retailers afhankelijk van de configuratie, wat de generaliseerbaarheid van de resultaten kan beperken.

Daarnaast is er in deze masterproef geen volledig geïntegreerd twee-echelon IRP ontwikkeld, maar een model voor het eerste echelon gebaseerd op een IRP voor het tweede echelon. Een volledig 2E-IRP zou namelijk te complex zijn geweest om binnen het tijdsbestek van deze masterproef te ontwikkelen. Ook worden er in het eerste echelon alleen directe ritten uitgevoerd van de leverancier naar het SCC, waardoor er geen sprake is van routeringsbeslissingen op dit niveau.

De experimenten zijn uitgevoerd met tien instanties per configuratie. Hoewel dit hetzelfde aantal is als in het doctoraat van Titi Iswari, zou een groter aantal instanties een betere afspiegeling van de realiteit kunnen opleveren. Mogelijke uitschieters binnen instanties wegen namelijk minder zwaar door bij een gemiddeld resultaat over een groter aantal instanties.

Verder is er, vanwege de beperkte looptijd van vijftien minuten in de LINGO-software, een kans op suboptimale oplossingen voor de instanties. Deze tijdsbeperking werd ingesteld om te voorkomen dat het model te lang doorloopt, maar dit kan de kwaliteit van de oplossingen beïnvloeden.

Tot slot zijn er slechts twee verschillende opslagcapaciteiten getest bij het SCC. Dit terwijl de keuze voor de juiste opslagcapaciteit van belang bleek te zijn voor de financiële levensvatbaarheid van het SCC, vermits deze een invloed had op de bezettingsgraad en de totale kosten.

### 7.2 Toekomstig onderzoek

Om ervoor te zorgen dat SCC's in de toekomst financieel duurzaam en succesvol kunnen zijn, is het belangrijk om de voor- en nadelen van het gebruik van een SCC op voorhand te onderzoeken en kwantificeren. Dit kan worden bereikt door middel van de in deze masterproef gepresenteerde en ontwikkelde modellen. Deze modellen moeten echter verder worden uitgewerkt en aangepast om realistischere kenmerken te incorporeren. Toekomstig onderzoek zou zich daarom moeten richten op de integratie en coördinatie van informatie tussen verschillende partners in de supply chain, zoals leveranciers, SCC's en retailers. Door deze informatie vervolgens in de modellen op te nemen, kunnen effectieve samenwerkingsmodellen en informatiedeling worden onderzocht, wat de efficiëntie van SCC's verder kan verbeteren en bijdragen aan hun succes in de praktijk.

Voor toekomstig onderzoek wordt daarom aanbevolen om variaties in voorraadkosten en aantallen leveranciers en retailers uitgebreider te onderzoeken. Door verschillende scenario's te analyseren, kunnen waardevolle inzichten worden verkregen over hoe deze factoren de efficiëntie en kosten beïnvloeden, wat bijdraagt aan een beter begrip van optimale voorraad- en routeringsbeslissingen. Daarnaast zou het nuttig zijn om in het eerste echelon diverse typen voertuigen te integreren, zoals vrachtwagens met een grotere capaciteit, naast bestelwagens. Dit kan bijdragen aan een robuuster en flexibeler stedelijk logistiek systeem door een breder scala aan logistieke scenario's te evalueren.

Het ontwikkelen en testen van een volledig geïntegreerd twee-echelon Inventory Routing Problem (IRP) kan eveneens waardevolle inzichten bieden. Dit onderzoek zou met name nuttig zijn in combinatie met de in deze masterproef toegepaste opslagcapaciteit bij het SCC, een aspect dat in de huidige literatuur nog beperkt is onderzocht. Er moet toekomstig onderzoek worden verricht naar de voorraad in het SCC, aangezien voorraad in het SCC vaak goedkoper is dan bij de retailers vanwege de lagere huurkosten aan de rand van steden. Bovendien kan opslagruimte bij retailers voor andere doeleinden worden ingezet indien de voorraad naar het SCC wordt verplaatst. Dit moet echter beter gekwantificeerd en geïntegreerd in modellen worden om aan verschillende belanghebbenden het nut van SCC's aan te tonen, waardoor een groter draagvlak en incentive ontstaat om deel te nemen aan een regeling met SCC's.

Het verhogen van het aantal instanties per configuratie in de optimalisatiesoftware kan tevens de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van de resultaten verbeteren, wat bijdraagt aan een betere validatie van de modellen en conclusies. Bovendien kan het verlengen van de looptijd van de optimalisatiesoftware helpen om meer gedetailleerde en verfijnde resultaten te verkrijgen, wat leidt tot een dieper inzicht in complexe logistieke patronen en optimalisatiestrategieën.

Tot slot is het raadzaam om een breder scala aan opslagcapaciteiten bij SCC's te testen. Dit kan helpen om de optimale configuratie voor verschillende scenario's te bepalen op basis van de beschikbare informatie en om betere inzichten te krijgen in de impact van veranderende opslagcapaciteit op logistieke prestaties en kosten. Hierdoor kan toekomstig onderzoek bijdragen aan een dieper begrip van de dynamiek van SCC's en hun potentieel om stedelijke logistieke uitdagingen op een efficiënte en (financieel) duurzame manier aan te pakken.

## 8 Bibliografie

- A. Guimarães, T., C. Coelho, L., M. Schenekemberg, C., & T. Scarpin, C. (2019). The two-echelon multi-depot inventory-routing problem. *Computers & Operations Research*, 101, 220-233.  
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.07.024>
- Aastrup, J., Gammelgaard, B., & Prockl, G. (2012). 3PL services in city logistics – a user’s perspective. *Proceedings of the 24th Annual Nordic Logistics Research Network Conference*. NOFOMA 2012, Naantali, Finland.
- Adulyasak, Y., Cordeau, J.-F., & Jans, R. (2014). Formulations and Branch-and-Cut Algorithms for Multivehicle Production and Inventory Routing Problems. *INFORMS Journal on Computing*, 26(1), 103-120. <https://doi.org/10.1287/ijoc.2013.0550>
- Agárdi, A., Kovács, L., & Bányai, T. (2019). Two—Echelon Vehicle Routing Problem with Recharge Stations. *Transport and Telecommunication Journal*, 20(4), 305-317.
- Allen, J., Browne, M., Woodburn, A., & Leonardi, J. (2012). The Role of Urban Consolidation Centres in Sustainable Freight Transport. *Transport Reviews*, 32(4), 473-490.  
<https://doi.org/10.1080/01441647.2012.688074>
- Andersson, H., Hoff, A., Christiansen, M., Hasle, G., & Løkketangen, A. (2010). Industrial aspects and literature survey: Combined inventory management and routing. *Computers & Operations Research*, 37(9), 1515-1536. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2009.11.009>
- Archetti, C., & Bertazzi, L. (2021). Recent challenges in Routing and Inventory Routing: E-commerce and last-mile delivery. *Networks*, 77(2), 255-268. <https://doi.org/10.1002/net.21995>
- Archetti, C., Bertazzi, L., Hertz, A., & Speranza, M. G. (2012). A Hybrid Heuristic for an Inventory Routing Problem. *INFORMS Journal on Computing*, 24.  
<https://doi.org/10.1287/ijoc.1100.0439>
- Archetti, C., Bertazzi, L., Laporte, G., & Speranza, M. G. (2007). A Branch-and-Cut Algorithm for a Vendor-Managed Inventory-Routing Problem. *Transportation Science*, 41(3), 382-391.  
<https://doi.org/10.1287/trsc.1060.0188>

- Archetti, C., Desaulniers, G., & Speranza, M. G. (2017). Minimizing the logistic ratio in the inventory routing problem. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 6(4), 289-306.  
<https://doi.org/10.1007/s13676-016-0097-9>
- Audit preview: Urban mobility in the EU*. (2020, juni 11). European Court of Auditors.  
<http://www.eca.europa.eu/en/Pages/Report.aspx?did=49865&TermStoreId=8935807f-8495-4a93-a302-f4b76776d8ea&TermSetId=49e662c4-f172-43ae-8a5e-7276133de92c&TermId=5f6589a2-5a2e-4ae8-8cc6-e05bf544b71f>
- Average retail sales growth per year by city, 2012-2025*. (z.d.). Statista. Geraadpleegd 14 november 2023, van <https://www.statista.com/statistics/249094/average-retail-sales-growth-per-year-by-city/>
- Axsäter, S. (2003). Supply Chain Operations: Serial and Distribution Inventory Systems. In *Handbooks in Operations Research and Management Science* (Vol. 11, pp. 525-559). Elsevier.  
[https://doi.org/10.1016/S0927-0507\(03\)11010-9](https://doi.org/10.1016/S0927-0507(03)11010-9)
- Axsäter, S. (Red.). (2006). Multi-Echelon Systems: Structures and Ordering Policies. In *Inventory Control* (pp. 187-219). Springer US. [https://doi.org/10.1007/0-387-33331-2\\_8](https://doi.org/10.1007/0-387-33331-2_8)
- Bell, W. J., Dalberto, L. M., Fisher, M. L., Greenfield, A. J., Jaikumar, R., Kedia, P., Mack, R. G., & Prutzman, P. J. (1983). Improving the Distribution of Industrial Gases with an On-Line Computerized Routing and Scheduling Optimizer. *Interfaces*, 13(6), 4-23.
- Bertazzi, L., Coelho, L. C., De Maio, A., & Laganà, D. (2019). A matheuristic algorithm for the multi-depot inventory routing problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 122, 524-544. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.01.005>
- Bevilaqua, A., Bevilaqua, D., & Yamanaka, K. (2019). Parallel island based Memetic Algorithm with Lin–Kernighan local search for a real-life Two-Echelon Heterogeneous Vehicle Routing Problem based on Brazilian wholesale companies. *Applied Soft Computing*, 76, 697-711.  
<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.12.036>

- Björklund, M., & Gustafsson, S. (2015). Toward sustainability with the coordinated freight distribution of municipal goods. *Journal of Cleaner Production*, 98(Journal Article), 194-204.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.043>
- Björklund, M., & Johansson, H. (2018). Urban consolidation centre – a literature review, categorisation, and a future research agenda. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 48(8), 745-764. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-01-2017-0050>
- Braekers, K., Ramaekers, K., & Van Nieuwenhuyse, I. (2016). The vehicle routing problem: State of the art classification and review. *Computers & Industrial Engineering*, 99, 300-313.  
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.12.007>
- Browne, M., Sweet, M., Woodburn, D. A., & Allen, J. (2005). *Urban Freight Consolidation Centres Final Report*.
- Cattaruzza, D., Absi, N., Feillet, D., & González-Feliu, J. (2017). Vehicle routing problems for city logistics. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 6(1), 51-79.  
<https://doi.org/10.1007/s13676-014-0074-0>
- Coelho, L. (2018). *The Multi-Depot Inventory Routing Problem: An Application of Vendor-Management Inventory in City Logistics*.
- Coelho, L. C., Cordeau, J.-F., & Laporte, G. (2014). Thirty Years of Inventory Routing. *Transportation Science*, 48(1), 1-19. <https://doi.org/10.1287/trsc.2013.0472>
- Coelho, L. C., & Laporte, G. (2013). The exact solution of several classes of inventory-routing problems. *Computers & Operations Research*, 40(2), 558-565.  
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2012.08.012>
- Crainic, T. G., Gendreau, M., & Jemai, L. (2020). Planning hyperconnected, urban logistics systems. *Transportation Research Procedia*, 47, 35-42. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.070>
- Crainic, T. G., Mancini, S., Perboli, G., & Tadei, R. (2012). Impact of Generalized Travel Costs on Satellite Location in the Two-Echelon Vehicle Routing Problem. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 39, 195-204. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.101>

- Crainic, T. G., & Montreuil, B. (2016). Physical Internet Enabled Hyperconnected City Logistics. *Transportation Research Procedia*, 12, 383-398. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.074>
- Crainic, T. G., Perboli, G., Mancini, S., & Tadei, R. (2010). Two-Echelon Vehicle Routing Problem: A satellite location analysis. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2(3), 5944-5955. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2010.04.009>
- Crainic, T. G., Ricciardi, N., & Storchi, G. (2009). Models for Evaluating and Planning City Logistics Systems. *Transportation Science*, 43(4), 432-454.
- Cuda, R., Guastaroba, G., & Speranza, M. G. (2015). A survey on two-echelon routing problems. *Computers & Operations Research*, 55, 185-199. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.06.008>
- de Kok, T., Grob, C., Laumanns, M., Minner, S., Rambau, J., & Schade, K. (2018). A typology and literature review on stochastic multi-echelon inventory models. *European Journal of Operational Research*, 269(3), 955-983. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.02.047>
- Dellaert, N., Van Woensel, T., Crainic, T. G., & Dashty Saridarq, F. (2021). A multi-commodity two-Echelon capacitated vehicle routing problem with time windows: Model formulations and solution approach. *Computers & Operations Research*, 127, 105154. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.105154>
- Dolati Neghabadi, P., Evrard Samuel, K., & Espinouse, M.-L. (2019). Systematic literature review on city logistics: Overview, classification and analysis. *International Journal of Production Research*, 57(3), 865-887. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1489153>
- Elbert, R., & Friedrich, C. (2020). Urban consolidation and cargo bikes: A simulation study. *Transportation Research Procedia*, 48, 439-451. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.051>
- Eurostat. (z.d.). *Urban-rural Europe*. Geraadpleegd 1 oktober 2023, van [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Urban-rural\\_Europe\\_-\\_introduction](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Urban-rural_Europe_-_introduction)

- Farias, K., Hadj-Hamou, K., & Yugma, C. (2021). Model and exact solution for a two-echelon inventory routing problem. *International Journal of Production Research*, 59(10), 3109-3132.  
<https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1746428>
- Gu, W., Archetti, C., Cattaruzza, D., Ogier, M., Semet, F., & Grazia Speranza, M. (2022). A sequential approach for a multi-commodity two-echelon distribution problem. *Computers & Industrial Engineering*, 163, 107793. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107793>
- Hasle, G., & Kloster, O. (2007). Geometric modelling, numerical simulation, and optimization. *Operations Research Computer Science Interfaces*, 397-436.
- Hemmelmayr, V. C., Cordeau, J.-F., & Crainic, T. G. (2012). An adaptive large neighborhood search heuristic for Two-Echelon Vehicle Routing Problems arising in city logistics. *Computers & Operations Research*, 39(12), 3215-3228. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2012.04.007>
- Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2010). *Introduction to operations research* (9de dr.). McGraw-Hill.  
<https://go.exlibris.link/Dm1BT9Gy>
- Iswari, T. (2023). *Optimizing City Logistics: Analyzing the Benefits of a City Hub and Integrated Inventory Routing Decisions*.
- Iswari, T., Caris, A., & Braekers, K. (2023). Analyzing the benefits of a city hub: An inventory and routing perspective. *Computers & Industrial Engineering*, 185, 109629.  
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109629>
- Janjevic, M., & Ndiaye, A. (2017). Investigating the financial viability of urban consolidation centre projects. *Research in Transportation Business & Management*, 24, 101-113.  
<https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2017.05.001>
- Johansson, H., & Björklund, M. (2017). Urban consolidation centres: Retail stores' demands for UCC services. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 47(7), 646-662. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-02-2017-0114>

- Kubek, D., & Więcek, P. (2019). An integrated multi-layer decision-making framework in the Physical Internet concept for the City Logistics. *Transportation Research Procedia*, 39, 221-230.  
<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.06.024>
- Li, J., Chu, F., & Chen, H. (2011). A solution approach to the inventory routing problem in a three-level distribution system. *European Journal of Operational Research*, 210(3), 736-744.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.10.020>
- Lin, J., Chen, Q., & Kawamura, K. (2016). Sustainability SI: Logistics Cost and Environmental Impact Analyses of Urban Delivery Consolidation Strategies. *Networks and Spatial Economics*, 16(1), 227-253. <https://doi.org/10.1007/s11067-014-9235-9>
- Malhene, N., Trentini, A., Marques, G., & Burlat, P. (2012). Freight consolidation centers for urban logistics solutions: The key role of interoperability. *2012 6th IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies (DEST)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/DEST.2012.6227939>
- McKinnon, A. C., Browne, M., Piecyk, M., & Whiteing, A. E. (Red.). (2015). *Green logistics: Improving the environmental sustainability of logistics* (3. ed). Kogan Page.
- Mendoza, A., & Ventura, J. A. (2010). A serial inventory system with supplier selection and order quantity allocation. *European Journal of Operational Research*, 207(3), 1304-1315.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.06.034>
- Paddeu, D. (2017). The Bristol-Bath Urban freight Consolidation Centre from the perspective of its users. *Case Studies on Transport Policy*, 5(3), 483-491.  
<https://doi.org/10.1016/j.cstp.2017.06.001>
- Paddeu, D. (2018). Sustainable Solutions for Urban Freight Transport and Logistics: An Analysis of Urban Consolidation Centers. In V. Zeimpekis, E. Aktas, M. Bourlakis, & I. Minis (Red.), *Sustainable Freight Transport: Theory, Models, and Case Studies* (pp. 121-137). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-62917-9\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-62917-9_8)

- Ribeiro, R., & Lourenço, H. (2003). Inventory-Routing Model, for a Multi-Period Problem with Stochastic and Deterministic Demand. *Department of Economics and Business, Universitat Pompeu Fabra, Economics Working Papers*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.563262>
- Rohmer, S. U. K., Claassen, G. D. H., & Laporte, G. (2019). A two-echelon inventory routing problem for perishable products. *Computers & Operations Research*, 107, 156-172. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.03.015>
- Saghir, M., & Jönson, G. (2001). Packaging handling evaluation methods in the grocery retail industry. *Packaging Technology & Science*, 14(1), 21-29. <https://doi.org/10.1002/pts.523>
- Schenekemberg, C. M., Scarpin, C. T., Pécora, J. E., Guimarães, T. A., & Coelho, L. C. (2020). The two-echelon inventory-routing problem with fleet management. *Computers & Operations Research*, 121, 104944. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.104944>
- Sluijk, N., Florio, A. M., Kinable, J., Dellaert, N., & Van Woensel, T. (2023). Two-echelon vehicle routing problems: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 304(3), 865-886. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.02.022>
- Soysal, M., Çimen, M., Belbağ, S., & Toğrul, E. (2019). A review on sustainable inventory routing. *Computers & Industrial Engineering*, 132, 395-411. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.04.026>
- Staiger, J. (z.d.). *Research Guides: How to Write a Literature Review: Citation Chaining*. Geraadpleegd 2 mei 2022, van <https://researchguides.uoregon.edu/litreview/citation-chaining>
- Staricco, L., & Brovarone, E. V. (2016). The spatial dimension of cycle logistics. *DOAJ (DOAJ: Directory of Open Access Journals)*, 9(2), 41-58. <https://doi.org/10.6092/1970-9870/3919>
- Taniguchi, E. (2014). Concepts of City Logistics for Sustainable and Liveable Cities. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 151, 310-317. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.10.029>
- Toth, P., & Vigo, D. (2002). The vehicle routing problem. *Monographs on discrete mathematics and applications*.

- van Heeswijk, W., Larsen, R., & Larsen, A. (2019). An urban consolidation center in the city of Copenhagen: A simulation study. *International Journal of Sustainable Transportation*, 13(9), 675-691. <https://doi.org/10.1080/15568318.2018.1503380>
- van Rooijen, T., & Quak, H. (2010). Local impacts of a new urban consolidation centre – the case of Binnenstadservice.nl. *Procedia, Social and Behavioral Sciences*, 2(3), 5967-5979. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2010.04.011>
- van Zelst, S., van Donselaar, K., van Woensel, T., Broekmeulen, R., & Fransoo, J. (2009). Logistics drivers for shelf stacking in grocery retail stores: Potential for efficiency improvement. *International Journal of Production Economics*, 121(2), 620-632. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.06.010>
- Ville, S., Gonzalez-Feliu, J., & Dablanc, L. (2013). The Limits of Public Policy Intervention in Urban Logistics: Lessons from Vicenza (Italy). *European Planning Studies*, 21(10), 1528-1541. <https://doi.org/10.1080/09654313.2012.722954>
- Williamson, T., Marner, B., & Beattie, C. (2022). *Document Status and Review Schedule*.
- World Bank. (z.d.). *Urban Development* [Text/HTML]. World Bank. Geraadpleegd 1 oktober 2023, van <https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/overview>
- Zhao, Q.-H., Chen, S., & Zang, C.-X. (2008). Model and algorithm for inventory/routing decision in a three-echelon logistics system. *European Journal of Operational Research*, 191(3), 623-635. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.12.056>

## 9 Bijlagen

### 9.1 Resultaten optimalisatie 10 retailers

|                    | <b>Totale leveringskost</b> | <b>Totale voorraadkost</b> | <b>Totale kosten</b> | <b>Logistieke ratio</b> | <b>Gemiddelde beladingsgraad</b> | <b>Aantal trips</b> |
|--------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------------------|---------------------|
| Instantie 0        | 834,257                     | 343,18                     | 1177,437             | 0,0551                  | 0,7895                           | 14                  |
| Instantie 1        | 760,4082                    | 341,65                     | 1102,0582            | 0,0480                  | 0,78464                          | 15                  |
| Instantie 2        | 615,2292                    | 291,65                     | 906,8792             | 0,0397                  | 0,7286                           | 16                  |
| Instantie 3        | 885,8235                    | 323,37                     | 1209,1935            | 0,0500                  | 0,7711                           | 16                  |
| Instantie 4        | 577,8963                    | 187,29                     | 765,1863             | 0,0368                  | 0,6758                           | 16                  |
| Instantie 5        | 871,2976                    | 388,53                     | 1259,8276            | 0,0556                  | 0,8313                           | 14                  |
| Instantie 6        | 1003,785                    | 376,15                     | 1379,935             | 0,0621                  | 0,8015                           | 14                  |
| Instantie 7        | 810,7592                    | 285,3                      | 1096,0592            | 0,0462                  | 0,7571                           | 16                  |
| Instantie 8        | 917,3261                    | 283,81                     | 1201,1361            | 0,0523                  | 0,7372                           | 16                  |
| Instantie 9        | 771,2001                    | 290,95                     | 1062,1501            | 0,0457                  | 0,7475                           | 16                  |
| <b>Gemiddelden</b> | <b>804,79822</b>            | <b>311,188</b>             | <b>1115,98622</b>    | <b>0,049156278</b>      | <b>0,762427083</b>               | <b>15,30</b>        |

## 9.2 Resultaten optimalisatie 30 retailers

|                    | <b>Totale leveringskost</b> | <b>Totale voorraadkost</b> | <b>Totale kosten</b> | <b>Logistieke ratio</b> | <b>Gemiddelde beladingsgraad</b> | <b>Aantal trips</b> |
|--------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------------------|---------------------|
| Instantie 0        | 2361,2287                   | 408,95                     | 2770,1787            | 0,0427                  | 0,8788                           | 37                  |
| Instantie 1        | 1977,388                    | 331,9                      | 2309,288             | 0,0347                  | 0,881222222                      | 38                  |
| Instantie 2        | 2481,7333                   | 386,71                     | 2868,4433            | 0,0409                  | 0,8602                           | 41                  |
| Instantie 3        | 2192,1632                   | 404,32                     | 2596,4832            | 0,0373                  | 0,8418                           | 42                  |
| Instantie 4        | 2250,403                    | 341,87                     | 2592,273             | 0,0386                  | 0,8476                           | 40                  |
| Instantie 5        | 2140,8936                   | 447,45                     | 2588,3436            | 0,0382                  | 0,8938                           | 38                  |
| Instantie 6        | 2286,375                    | 419,19                     | 2705,565             | 0,0373                  | 0,9076                           | 40                  |
| Instantie 7        | 2404,3698                   | 365,04                     | 2769,4098            | 0,0427                  | 0,8556                           | 38                  |
| Instantie 8        | 2159,5069                   | 334,72                     | 2494,2269            | 0,0351                  | 0,8368                           | 43                  |
| Instantie 9        | 2349,5592                   | 476,03                     | 2825,5892            | 0,0430                  | 0,9124                           | 36                  |
| <b>Gemiddelden</b> | <b>2260,36207</b>           | <b>391,618</b>             | <b>2651,98007</b>    | <b>0,03904968</b>       | <b>0,871575248</b>               | <b>39,30</b>        |

### 9.3 Resultaten optimalisatie 10 retailers LC

|                    | <b>Totale leveringskost</b> | <b>Totale voorraadkost</b> | <b>Totale kosten</b> | <b>Logistieke ratio</b> | <b>Gemiddelde beladingsgraad</b> | <b>Aantal trips</b> |
|--------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------------------|---------------------|
| Instantie 0        | 1118,9156                   | 229,08                     | 1347,9956            | 0,0631                  | 0,5871                           | 19                  |
| Instantie 1        | 1009,4755                   | 223,09                     | 1232,5655            | 0,0537                  | 0,56460                          | 21                  |
| Instantie 2        | 726,8654                    | 246,48                     | 973,3454             | 0,0426                  | 0,6170                           | 20                  |
| Instantie 3        | 1113,4719                   | 230,32                     | 1343,7919            | 0,0556                  | 0,6116                           | 20                  |
| Instantie 4        | 656,3958                    | 146,84                     | 803,2358             | 0,0386                  | 0,6152                           | 18                  |
| Instantie 5        | 1146,4736                   | 256,19                     | 1402,6636            | 0,0619                  | 0,6452                           | 18                  |
| Instantie 6        | 1339,9961                   | 275,02                     | 1615,0161            | 0,0727                  | 0,6025                           | 19                  |
| Instantie 7        | 991,4699                    | 218,28                     | 1209,7499            | 0,0510                  | 0,6271                           | 20                  |
| Instantie 8        | 1012,122                    | 240,96                     | 1253,082             | 0,0546                  | 0,6477                           | 18                  |
| Instantie 9        | 1025,6359                   | 158,6                      | 1184,2359            | 0,0510                  | 0,5468                           | 22                  |
| <b>Gemiddelden</b> | <b>1014,08217</b>           | <b>222,486</b>             | <b>1236,56817</b>    | <b>0,054473224</b>      | <b>0,606495139</b>               | <b>19,50</b>        |

## 9.4 Resultaten optimalisatie 30 retailers LC

|                    | <b>Totale leveringskost</b> | <b>Totale voorraadkost</b> | <b>Totale kosten</b> | <b>Logistieke ratio</b> | <b>Gemiddelde beladingsgraad</b> | <b>Aantal trips</b> |
|--------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------------------|---------------------|
| Instantie 0        | 2599,9915                   | 292,89                     | 2892,8815            | 0,0446                  | 0,7715                           | 43                  |
| Instantie 1        | 2148,8628                   | 226,57                     | 2375,4328            | 0,0356                  | 0,793608962                      | 43                  |
| Instantie 2        | 2611,8969                   | 277,62                     | 2889,5169            | 0,0412                  | 0,8076                           | 44                  |
| Instantie 3        | 2443,844                    | 292,46                     | 2736,304             | 0,0393                  | 0,7429                           | 48                  |
| Instantie 4        | 2273,6224                   | 254,99                     | 2528,6124            | 0,0376                  | 0,8156                           | 42                  |
| Instantie 5        | 2500,3632                   | 282,56                     | 2782,9232            | 0,0411                  | 0,7620                           | 45                  |
| Instantie 6        | 2668,2189                   | 284,97                     | 2953,1889            | 0,0408                  | 0,7751                           | 47                  |
| Instantie 7        | 2599,7477                   | 288,29                     | 2888,0377            | 0,0445                  | 0,7722                           | 43                  |
| Instantie 8        | 2344,5038                   | 231,85                     | 2576,3538            | 0,0362                  | 0,7776                           | 46                  |
| Instantie 9        | 2741,1524                   | 312,67                     | 3053,8224            | 0,0465                  | 0,7820                           | 42                  |
| <b>Gemiddelden</b> | <b>2493,22036</b>           | <b>274,487</b>             | <b>2767,70736</b>    | <b>0,040748886</b>      | <b>0,780016323</b>               | <b>44,30</b>        |