



**UHASSELT**

KNOWLEDGE IN ACTION

## Faculteit Bedrijfseconomische Wetenschappen

master handelsingenieur

### ***Masterthesis***

#### ***Opportunities for operational research in the physical internet***

#### **Michiel Van Caekenberghe**

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

#### **PROMOTOR :**

Prof. dr. An CARIS



**UHASSELT**

KNOWLEDGE IN ACTION

**[www.uhasselt.be](http://www.uhasselt.be)**

Universiteit Hasselt  
Campus Hasselt:  
Martelarenlaan 42 | 3500 Hasselt  
Campus Diepenbeek:  
Agoralaan Gebouw D | 3590 Diepenbeek

**2022**  
**2023**



# **Faculteit Bedrijfseconomische Wetenschappen**

master handelsingenieur

## ***Masterthesis***

### ***Opportunities for operational research in the physical internet***

**Michiel Van Caekenberghe**

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

## **PROMOTOR :**

Prof. dr. An CARIS



# Woord vooraf

Met trots en voldoening presenteer ik hierbij mijn thesis, het resultaat van een lang proces dat vaak vermoeiend, maar vooral boeiend en leerzaam was. Ik heb met grote interesse en nieuwsgierigheid de wereld van het Physical Internet (PI) verkend, met als doel inzichten te verwerven en bij te dragen aan dit boeiende onderzoeksgebied. Mijn oprechte dank gaat eerst en vooral uit naar mijn promotor Prof. Dr. An Caris voor haar goede begeleiding. Daarnaast wil ik mijn vriendin, medestudenten, vrienden en familie bedanken voor hun onschatbare steun en aanmoediging gedurende het afgelopen jaar.

Deze thesis bespreekt niet alleen de kernprincipes van het Physical Internet, maar belicht ook de beperkingen en mogelijke toekomstige richtingen van onderzoek. Ik hoop dat dit werk niet alleen een bijdrage levert aan het begrip van dit concept, maar ook als inspiratie dient voor verdere exploratie en innovatie op het gebied van logistiek en transport.

Ik nodig u uit om met nieuwsgierigheid en interesse deze thesis te verkennen. Hopelijk leert u iets bij, en kan deze thesis bijdragen aan de groeiende kennis over het Physical Internet.

Veel leesplezier!

Michiel Van Caekenberghe

# Samenvatting

## Probleemstelling

Het concept van het Physical Internet (PI) probeert een oplossing te bieden voor de huidige niet-duurzame praktijken in vrachttransport. Het PI is gebaseerd op het digitale internet, waarbij berichten worden opgedeeld in kleine stukjes (pakketten) die verschillende routes nemen door het internet en dan weer worden samengevoegd bij de ontvanger. Het PI past dit concept toe op de fysieke wereld, waarbij goederen via verschillende verbindingen in een globaal netwerk worden vervoerd van hun oorsprong naar bestemmingen, en dit gebeurt met gestandaardiseerde containers en behandelingsprocedures. Het is een uitdaging om de reeds gekende methoden uit het operationeel onderzoek toe te passen op het PI. Het doel van deze thesis is om aan de hand van een gestructureerde literatuurstudie, recente en relevante literatuur rond het PI samen te brengen en hier nuttige verbanden uit te halen om verder onderzoek te ondersteunen. Om dit doel te bereiken werden de volgende onderzoeksvragen opgesteld:

## Onderzoeksvragen

*1. Welke methoden uit operationeel onderzoek worden toegepast om planningsmodellen te ontwikkelen binnen het PI?*

*1.1 Welke soort problemen worden besproken in de PI-literatuur?*

*1.2 Welke kenmerken/eigenschappen van het PI worden toegepast op deze beslissingsmodellen?*

## Methode

De methodologie die wordt gebruikt is een systematische literatuurstudie. Voor het verzamelen van literatuur werd gebruik gemaakt van de Scopus database. Er werd gezocht in de titel, abstract en de kernwoorden naar kernwoord "Physical Internet". Er werd enkel gezocht naar Engelstalige, gerankte wetenschappelijke papers. Deze zoekopdracht resulteerde in 105 bronnen. Deze bronnen werden vervolgens eerst globaal bekeken. Hieruit konden 30 bronnen worden uitgesloten aangezien de titels/abstracten niet relevant waren. De overige 75 bronnen werden in detail gelezen. Deze keer werd er gekeken of de bronnen duidelijke beslissingen ondersteunden met hun modellen, of er methodes uit operationeel onderzoek werden toegepast, en of de tijdschriften waarin de bronnen werden gepubliceerd gerankt zijn volgens de 'Journal impact factor' (JIF) in de 'Web of Science' database. Op basis van deze criteria werden er 44 bronnen uitgesloten. Dit resulteerde in 24 bronnen die gebruikt zijn voor de literatuurstudie.

## Resultaten

De literatuur werd eerst en vooral opgedeeld in twee hoofdniveaus's, namelijk het strategische/tactische planningsniveau en het operationele planningsniveau. In het strategisch/tactisch planningsniveau wordt het fysieke netwerk ontworpen en worden de routes in het netwerk bepaald. De tijdshorizon waarin beslissingen worden genomen bedraagt 1 tot 5 jaar. In het operationeel planningsniveau worden beslissingen wekelijks en zelfs dagelijks genomen. Deze beslissingen zijn gedetailleerd en gaan voornamelijk over routing van voertuigen door het netwerk en het toewijzen van vracht aan transportbedrijven. Van de 24 gebruikte bronnen behoren er 9 tot het strategische/tactische niveau, en 17 tot het operationele niveau. De grote meerderheid van de verzamelde bronnen bespreken dus operationele problemen in de context van het PI. Vervolgens werd er per niveau gekeken naar welke soort logistieke problemen er in de literatuur worden besproken en welke kenmerken uit het PI er worden gemodelleerd.

### *Strategisch/tactisch niveau*

In het strategische/tactische niveau worden voornamelijk problemen besproken die gaan over netwerk design, aangezien dit in 7 van de 9 bronnen aan bod komt. Network Design bepaalt de fysieke configuratie en infrastructuur van de toeleveringsketen. Belangrijke beslissingen rond het aantal en de locatie van magazijnen/(PI)-hubs worden hier genomen. De overige 2 bronnen gaan over prijsmechanismen gebaseerd op veilingen. Prijsmechanismen dienen om transportaanvragen te linken aan het beschikbaar aanbod van verladers, met als uitkomst een prijs. Om efficiënt over prijzen te kunnen onderhandelen, wordt er in de literatuur gebruik gemaakt van veilingen. De PI-kenmerken die in dit niveau voornamelijk worden meegenomen in de modellen zijn interconnectiviteit en het gebruik van een wereldwijd open supply web. Deze kenmerken worden toegepast in acht van de negen bronnen. In de literatuur wordt dit voornamelijk bereikt door netwerken te ontwerpen waarbij alle knooppunten (hubs) met elkaar verbonden zijn, zodat alle routes beschikbaar zijn voor het transport van  $\Pi$ -containers. Bovendien worden deze verschillende routes toegankelijk gemaakt voor alle spelers in het model.

### *Operationeel niveau*

In het operationele niveau komen de routeringsproblemen het meest aan bod, met 10 van de 17 bronnen die hieronder vallen. In de literatuur worden dit soort problemen vaak 'vehicle routing problems' (VRP) genoemd waarbij het doel is om goederen aan een aantal klanten met gekende vraag te leveren doormiddel van routes die vertrekken en eindigen op hetzelfde depot en met minimale kosten. Het op een na meest voorkomende probleem in de literatuur is de operationele planning in hubs, waar 5 van de 17 bronnen onder vallen. De overige twee bronnen gaan over het toewijzen van transportorders aan transportfirma's.

Binnen het operationele planningsniveau wordt het meest aandacht besteed aan de volgende PI-kenmerken; infrastructuur, interconnectiviteit, open hubs en het gebruik van een wereldwijd open

supply hub. Wat betreft de infrastructuur kan over de PI-containers worden gesteld dat deze dienen als de basisobjecten van de logistieke activiteiten, in plaats van de goederen zelf, volgens de modellen die zijn onderzocht. De bronnen die specifiek over PI-hubs spreken, concluderen over het algemeen dat deze duurzamer zijn in vergelijking met conventionele crossdocks, wat het belang van dit kenmerk van het PI bevestigt.

Bij de kenmerken open hubs en interconnectiviteit gaat het voornamelijk om de mogelijkheid om meerdere hubs te gebruiken voor goederentransport, evenals de samenwerking tussen verschillende spelers in het PI. Deze kenmerken resulteren in het openlijk delen van informatie, wat leidt tot efficiëntere planningen op het gebied van routes en hubs. Over het algemeen leidt dit tot een efficiënter en duurzamer resultaat, hoewel het afhankelijk kan zijn van het aantal beschikbare hubs, voertuigen en spelers die bereid zijn samen te werken.

## **Kritische beschouwingen**

### *kansen voor toekomstig onderzoek*

Het grote deel van de literatuur gaat over het operationeel niveau. Dit is opvallend aangezien het logisch lijkt dat een innovatief concept als het PI eerst op strategische niveau grondig moet worden onderzocht, zodat er een duidelijke basis is voor operationeel onderzoek om specifiekere logistieke problemen op te lossen en modelleren. Er is dus een kans om toekomstig onderzoek meer op strategisch niveau te richten. Binnen het operationeel niveau krijgen routeringsproblemen meer aandacht dan de planning in hubs. Deze routeringsmodellen kunnen echter slechts praktisch toepasbaar zijn als ook de werking binnen de verschillende hubs in het netwerk is aangepast aan het PI. Daarom is er ook op dit vlak een kans voor toekomstig onderzoek om dit te garanderen. Tot slot worden vooral de PI-kenmerken infrastructuur, interconnectiviteit, open hubs en wereldwijde supply hub opgenomen in de modellen. Minder besproken kenmerken zijn digitale connectiviteit, netwerkweerstand en multi-vehicle modellen. Ook deze laatste kenmerken zouden meer moeten voorkomen binnen het PI-onderzoek.

### *beperkingen*

Door selectie van enkel wetenschappelijke artikelen kunnen mogelijk recente inzichten in het PI ontbreken (bijvoorbeeld uit conference papers, boeken etc.). Ook werden bronnen zonder officiële ranking die mogelijk toch relevante literatuur bevatten niet opgenomen. Verder zijn er enkele bronnen die niet strikt overeenkwamen met alle criteria toch opgenomen in het onderzoek. Er bestaat twijfel over de bruikbaarheid van bepaalde categorieën met weinig bronnen. De Analyse van PI-kenmerken is gefocust op gemeenschappelijke aspecten in de bronnen, afgestemd op het origineel concept van Montreuil, maar interpretatievariaties zijn mogelijk door evolutie van het concept.



# Inhoudsopgave

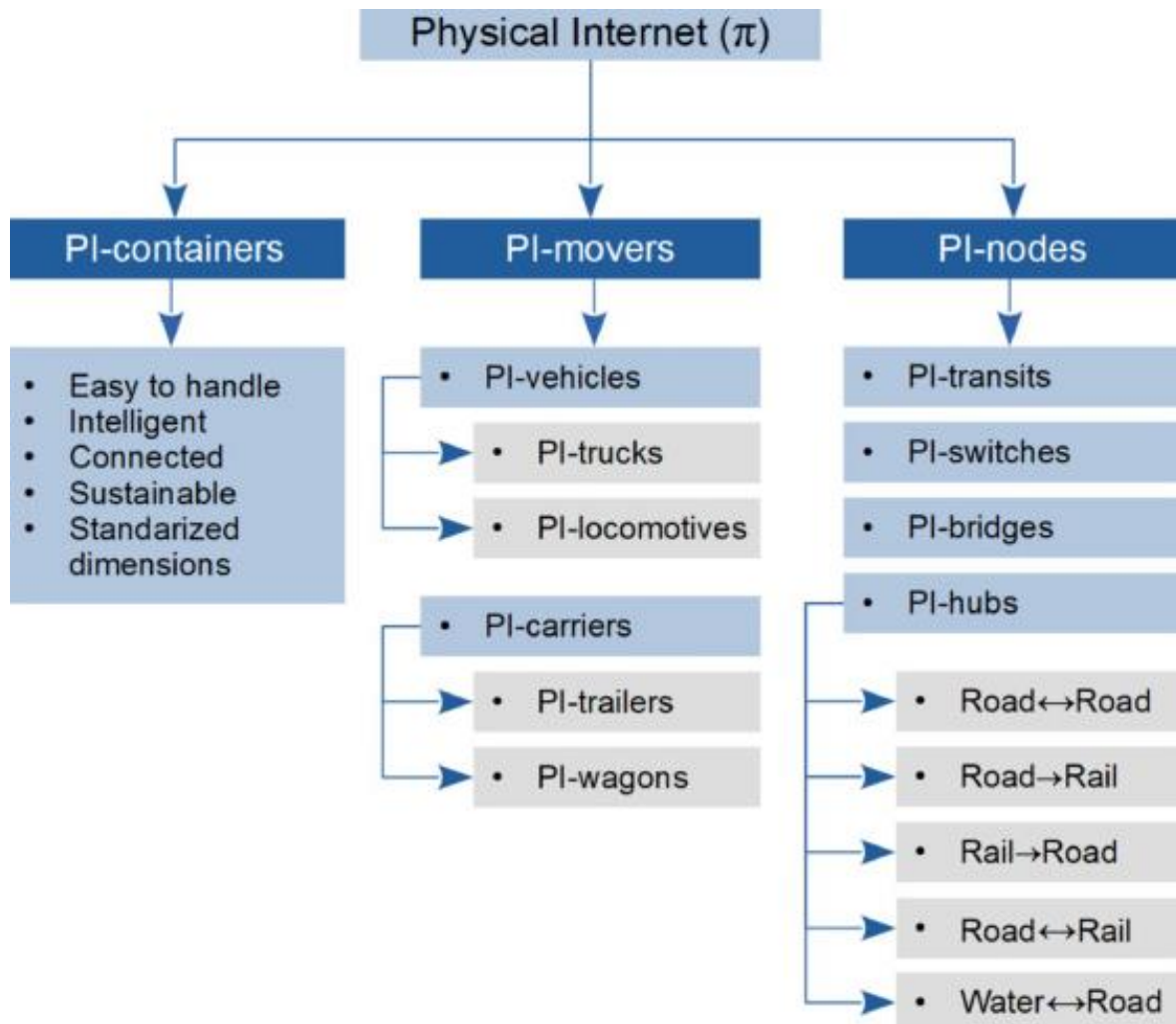
|                                                         |           |
|---------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Inleiding</b>                                     | <b>7</b>  |
| 1.1 Physical internet: het concept en de hoofdkenmerken | 10        |
| 1.2 Planningsniveau's                                   | 15        |
| 1.3 Methodes                                            | 15        |
| <b>2. Strategisch/tactisch planningsniveau</b>          | <b>20</b> |
| 2.1 Netwerk Design                                      | 21        |
| 2.2 Prijsmechanismen gebaseerd op veilingen             | 27        |
| 2.4 Oplossingsmethoden                                  | 28        |
| 2.5 $\Pi$ -kenmerken op strategisch niveau              | 28        |
| <b>3. Operationeel planningsniveau</b>                  | <b>34</b> |
| 3.1 Routing                                             | 36        |
| 3.2 Operationele planning in hubs                       | 44        |
| 3.3 Toewijziging transport orders aan uitvoerders       | 47        |
| 3.4 Oplossingsmethoden                                  | 49        |
| 3.5 $\Pi$ - kenmerken op operationeel niveau            | 50        |
| <b>4. Conclusie</b>                                     | <b>56</b> |
| <b>5. Discussie</b>                                     | <b>58</b> |
| <b>Referenties</b>                                      | <b>60</b> |

# 1. Inleiding

Door onder meer de groei van e-commerce in de afgelopen decennia en de coronacrisis van afgelopen jaren, wordt de logistieke sector geconfronteerd met ongekende kansen en uitdagingen. De stijging in gebruik van online winkelplatforms heeft het winkelgedrag van klanten veranderd van offline naar online, waardoor hun eisen aan logistieke dienstverlening sterk toenemen en ze hiermee ook bijdragen aan economische groei in de logistieke sector. Echter, de uitdagingen waarmee de logistieke sector mee in aanraking komt zijn opmerkelijk. Aan de ene kant hebben klanten meer dan ooit behoefte aan hoogwaardige logistieke service, en aan de andere kant is de huidige staat van logistiek economisch, ecologisch en sociaal onhoudbaar. Milieuproblemen die veroorzaakt worden door de toeleveringsketen zoals uitstoot van broeikasgassen zijn al jarenlang aanwezig.

De grote vraag van de afgelopen jaren binnen de logistieke sector is hoe het wereldwijde logistieke systeem efficiënter, effectiever en duurzaam kan gemaakt worden. Het *Physical Internet* (PI vanaf hier) is een van de meest innovatieve concepten waarin een nieuwe fundamentele oplossing voor de huidige niet-duurzame activiteiten rond vrachttransport wordt ontwikkeld. Het PI is geïnspireerd op de metafoor van het digitale internet dat gebruik maakt van pakket wisseling; het bericht wordt opgesplitst in verschillende stukjes (pakketten) die via verschillende routes over het internet reizen en vervolgens aan de kant van de ontvanger worden samengebracht. De pakketten worden gerouteerd via een onderling verbonden netwerk van *nodes/hubs* afhankelijk van de netwerkcapaciteit. Dit concept wordt dus toegepast door het PI waar de fysieke goederen via verschillende verbindingen worden gerouteerd van hun oorsprong naar bestemmingen in gestandaardiseerde containers met gestandaardiseerde behandelingsprocedures. Met andere woorden, het idee lijkt op een e-mailverzendsproces waarbij de afzender zich geen zorgen maakt over hoe en door wiens netwerk het bericht naar de eindbestemming wordt gebracht. De eerste formele definitie van PI werd geïntroduceerd door Montreuil in 2013 (Montreuil et al., 2013) waarin het beschreven wordt als een wereldwijd open logistiek systeem gebaseerd op de fysieke, digitale en operationele interconnectiviteit door middel van *encapsulation*, *interfaces* en protocollen. Het is geïntroduceerd als een oplossing om de manier te verbeteren waarop fysieke objecten over de hele wereld worden getransporteerd, opgeslagen, gebruikt en geleverd om meer economische, ecologische en sociale efficiëntie te bereiken.

De fysieke elementen binnen het PI zijn *n-nodes*, *n-movers* en *n-containers* en worden weergegeven in figuur 1 (Chargui et al., 2022; Montreuil, 2011). *n-containers* zijn gestandaardiseerde containers die kunnen behandeld en opgeslagen worden door verschillende bedrijven. *n-movers*, zoals *n-voertuigen* (*n-trucks*, *n-lifts* etc.) dienen om *n-containers* te verplaatsen. *n-nodes* zijn locaties voor het ontvangen, opslaan en het overdragen van *n-containers* tussen *n-movers* (Chargui et al., 2022). Een voorbeeld van een *n-node* zijn *n-hubs*, zoals road-rail hubs en road-road hubs. Deze elementen zorgen samen voor standaardisatie en universele interconnectiviteit binnen het logistieke systeem.



*Figuur 1. PI hoofdcomponenten (Chargui et al., 2022)*

Aangezien het PI een vrij recent concept is heerst er nog veel onduidelijkheid over de potentiële voordelen van het PI in de logistieke sector. Ook betekent dit dat er continu onderzoek wordt gedaan rond dit opkomend concept. Onderzoekers hebben verschillende interpretaties van de concepten omschreven door Montreuil en nemen deze op andere manieren mee op in hun modellen. Het is dan ook een uitdaging om de reeds gekende methoden uit het operationeel onderzoek toe te passen op het PI, en om vervolgens tot toepasbare oplossingen te bekomen. Het doel van deze thesis is om aan de hand van een gestructureerde literatuurstudie, recente en relevante literatuur rond het PI samen te brengen en hier nuttige verbanden uit te halen om verder onderzoek te ondersteunen. Om dit doel te bereiken worden de volgende onderzoeksvragen opgesteld.

## **Centrale onderzoeksvraag:**

**Welke methoden uit operationeel onderzoek worden toegepast om planningsmodellen te ontwikkelen binnen het PI?**

Om op deze brede vraag een zinvol antwoord te kunnen geven worden de volgende ondersteunende deelvragen geformuleerd:

1. Welke soort problemen worden besproken in de PI-literatuur?
2. Welke kenmerken/eigenschappen van het PI worden toegepast op deze beslissingsmodellen?

## 1.1 Physical internet: het concept en de hoofdkenmerken

Zoals eerder vermeld werd het physical internet voor het eerst geïntroduceerd in 2011 en formeel gedefinieerd in 2013 (Montreuil, 2011; Montreuil et al., 2013). De informatie die volgt is dan ook grotendeels terug te vinden en in meer detail omschreven in deze twee belangrijke papers, tenzij anders vermeld. Het doel van PI is om de distributie van goederen volledig te reorganiseren op een efficiënte manier die economisch, ecologisch en sociaal duurzaam is. Deze visie wordt door Montreuil gedefinieerd aan de hand van dertien kenmerken die verder kort zullen worden besproken. Verder in de thesis zullen deze kenmerken vergeleken worden met de kenmerken zoals de auteurs van de verzamelde literatuur deze bespreken en opnemen in hun modellen. Er wordt ook meermaals de vergelijking gemaakt met het digitale internet, dat dient als metafoor voor het PI.

### 1.1.1 Het inkapselen van goederen in wereldwijd gestandaardiseerde, groene, modulaire containers.

Het digitale internet verzendt geen informatie; het verzendt pakketten die informatie bevatten. De informatie in een pakket is ingekapseld en wordt zelf niet behandeld door het internet. De pakketkop bevat alle informatie die nodig is om het pakket te identificeren en correct naar de bestemming te routeren. Het digitale internet is gebaseerd op een protocol voor het structureren van gegevenspakketten, onafhankelijk van de infrastructuur. Op deze manier kunnen gegevenspakketten worden verwerkt door verschillende systemen en via verschillende netwerken: modems, koperen draden, glasvezel draden, routers, enz. In het huidige logistiek systeem wordt er ook al gebruik gemaakt van standaardisatie bij containers. Huidige logistieke systemen maken bijvoorbeeld gebruik van standaard 20- en 40-voet containertransport bij grote goederen en in het geval van kleine goederen wordt pakketlogistiek gebruikt, bekend bij grote bedrijven zoals DHL, FedEx, en UPS. In beide gevallen wordt er gebruik gemaakt van standaardisatie van fysieke pakketten in de vorm van respectievelijk containers en pakketten, waarbij er keuze is tussen enkele verschillende vaste afmetingen. Het PI veralgemeniseert en breidt deze praktijk aanzienlijk uit. (Montreuil, 2011)

Het PI verpakt goederen in  $\Pi$ -containers die gestandaardiseerd, slim, groen en modulair zijn. Ze zijn opmerkelijk gemoduleerd en gestandaardiseerd over de hele wereld in termen van afmetingen, functies en uitrustingen. De belangrijkste functionele specificaties van  $\Pi$ -containers zijn dat ze zijn ontworpen om ruimte en gewicht te optimaliseren, gemakkelijk te vervoeren zijn en een veilige en efficiënte behandeling van goederen bieden. Deze  $\Pi$ -containers zijn uitgerust met verschillende sensoren en communicatietechnologieën die het mogelijk maken om ze in real-time te volgen en te beheren, en waardevolle gegevens te verzamelen over de locatie, status en conditie van goederen. Het fysieke internet steunt op een netwerk van onderling verbonden logistieke knooppunten, of hyperconnected warehouses, waar  $\Pi$ -containers worden gerouteerd en overgedragen met behulp van een set gestandaardiseerde protocollen en processen. Het doel van het fysieke internet is om naadloos en efficiënt transport van goederen mogelijk te maken, waarbij het gebruik van

hulpbronnen wordt geoptimaliseerd en de milieueffecten van logistieke operaties worden verminderd. (Montreuil, 2011)

#### 1.1.2 Universele interconnectiviteit

Een fundamenteel doel van het PI is universele interconnectiviteit. Dit resulteert in een zoektocht naar high-performance logistieke centra, systemen en vervoerders. Er wordt dan gebruik gemaakt van standaardprotocollen om n-containers via verschillende transportmodi en routes met elkaar te verbinden. Zoals momenteel geconceptualiseerd, zijn activiteiten zoals sorteren, opslaan en behandelen van fysieke objecten vaak remmingen voor interconnectiviteit. Dit gebeurt bijvoorbeeld in cross-docking platforms. Er zijn echter uitzonderingen, zoals sommige recent geïmplementeerde en opnieuw ontworpen containerhavens. Een belangrijk doel van de universele interconnectiviteit via het PI is om de tijdelijke en economische kosten van het breken van lading bijna verwaarloosbaar te maken. Een doelstelling is bijvoorbeeld dat intermodaal LTL-transport (less-than-truckload) bijna dezelfde prijs, snelheid en betrouwbaarheid heeft als huidige enkelvoudige vrachtwagenladingen.

#### 1.1.3 Gebruik maken van slimme containers en slimme objecten

Het PI maakt optimaal gebruik van de mogelijkheden van slimme n-containers die zijn verbonden met het Digitale Internet en het World Wide Web, en van hun ingebedde slimme objecten, om de prestaties die door klanten worden waargenomen en de algehele prestaties van het Fysieke Internet te verbeteren. Zo heeft elke slimme n-container bijvoorbeeld een unieke wereldwijde identificatie vergelijkbaar met het MAC-adres in het Digitale Internet. Het slimme label zorgt onder anderen voor identificatie, integriteit, routing, conditionering, monitoring, traceerbaarheid en beveiliging van elke n-container. Hierbij worden technologieën zoals RFID en GPS gebruikt.

#### 1.1.4 Van material handling naar $\Pi$ -container handling en opslagsystemen

In het PI bestaan er geen algemene, allesomvattende systemen voor opslag en material handling. Deze systemen zijn er enkel voor n-containers. Hierbij worden innovatieve technologieën en processen geïntegreerd om de eigenschappen van n-containers te benutten. Zo wordt er op een goedkope en een betrouwbare manier opslag en bescherming van goederen gerealiseerd via slimme en duurzame automatisering.

#### 1.1.5 Multi-segment, intermodaal transport (vs. point-to-point hub-and-spoke transport)

Wanneer er in het digitale internet bijvoorbeeld een e-mail wordt verstuurd, gaan de datapakketten niet direct van bronknooppunt A naar bestemmingsknooppunt B. De pakketten reizen door middel van een reeks routers en kabels, dynamisch verplaatst van oorsprong naar bestemming op de best mogelijke manier, rekening houdend met de routeringsalgoritmes en congestie op de netwerken. Zo kan een e-mail van Antwerpen naar Miami door tientallen routers over de hele wereld gaan. Verschillende datapakketten die samen een bericht vormen, moeten niet per se samen verstuurd

worden. Elk pakket kan uiteindelijk zijn eigen route afleggen; het uiteindelijke bericht wordt gereconstrueerd bij aankomst van de pakketten op de eindbestemming. Momenteel wordt de logistiek gedomineerd door een combinatie van punt-tot-punt transport en hub-en-spoke transport. Hoewel deze twee manieren haalbaar zijn in het PI, verschuift de voorkeur naar multi-segment, intermodaal transport. Het verschil kan worden uitgelegd aan het volgende voorbeeld. Stel dat een verlader een trailer vol met containers van Brussel naar Hamburg wil verplaatsen. In een conventioneel logistiek systeem is de kans groot dat er ten eerste een chauffeur/vrachtwagen duo wordt toegewezen aan een meerdaagse route. De chauffeur zal zelf naar de bestemming rijden en onderweg in de vrachtwagen slapen. Na het leveren van de trailer in Hamburg zal er worden gezocht naar een andere trailer in de buurt van Hamburg die terug moet naar de buurt van Brussel, om leeg transport te vermijden. Dit is een eenvoudig punt-tot-punt transport dat in het PI zeer uitzonderlijk zou zijn. In werkelijkheid zou er eerst een chauffeur/vrachtwagen duo worden toegewezen voor het transport van de trailer naar een PI-hub enkele uren van Brussel, waar de container tijdelijk wordt opgeslaan. Dit eerste duo zal dan een nieuwe trailer meepakken terug richting Brussel. De trailer zal zo snel mogelijk aan een tweede chauffeur/vrachtwagen duo (of containers worden apart via andere transportmodi zoals treinen, schepen, vliegtuigen vervoerd) worden overgedragen en worden vervoerd naar een volgend PI-hub, tot de trailer (of alle containers) in Hamburg aankomt.

#### 1.1.6 Activeren en gebruiken van een open globaal bevoorradingsweb

Op basis van de huidige logistieke organisatie zijn producenten, distributeurs en retailers voornamelijk afhankelijk van private toeleveringsketens en netwerken, bestaande uit de productie- en distributiecentra van hun eigen bedrijf en die van hun partners. Sommigen vertrouwen op logistieke dienstverleners van derden, maar ze zijn meestal gebonden aan langetermijncontracten met de dienstverleners die voornamelijk faciliteiten aan hen toewijzen. Het PI maakt het mogelijk om over te stappen van private bevoorradingsnetwerken naar een open globaal bevoorradingsweb. Een bevoorradingsweb bestaat uit netwerken van onderling verbonden bevoorradingsnetwerken, elk met onderling verweven bevoorradingsketens, waarbij meerdere organisaties betrokken zijn met collaboratieve of competitieve relaties. Met andere woorden is het een wereldwijd open web van productiecentra, distributiecentra, magazijnen, hubs en transitcentra, waardoor producenten, distributeurs en retailers hun producten met n-containers dynamisch kunnen inzetten op meerdere geografisch verspreide centra. Ze kunnen deze produceren, verplaatsen en opslaan voor snelle, efficiënte en betrouwbare levering als antwoord op de stochastische vraag van klanten. Dit heeft potentieel enorme positieve gevolgen voor ondernemingen, in termen van toeleveringsproductiviteit, responsiviteit, aanpassingsvermogen en veerkracht.

#### 1.1.7 Een uniform conceptueel raamwerk met meerdere niveau's

Het conceptuele kader van het PI is gebaseerd op dezelfde principes, ongeacht de schaal van de betrokken netwerken. Dit kan worden uitgedrukt in verschillende lagen waarbij netwerken zijn ingebed in bredere netwerken, die elk werken volgens de protocollen en normen van het PI.

#### 1.1.8 Ontwerpen van producten die passen in containers met minimale lege ruimte

Het PI plaatst fysieke objecten in modulaire n-containers. Daarom moeten de objecten die binnen n-containers moeten worden vervoerd worden ontworpen en ontwikkeld om de belasting op het PI te minimaliseren, met afmetingen aangepast aan de standaard containerafmetingen. Het doel is om maximale volumetrische en functionele dichtheid te hebben terwijl ze containerized zijn, passend binnen de modulaire afmetingen van de n-containers en uitbreidbaar naar hun gebruiksdimensies indien nodig. Functionele dichtheid van een object wordt hier gedefinieerd als de verhouding van zijn nuttige functionaliteit over het product van zijn gewicht en volume. Het doel is dat elk fysiek object dat door het PI wordt behandeld, zo klein mogelijk in een n-container past om te voorkomen dat er lucht in de n-containers wordt verplaatst en opgeslagen.

#### 1.1.9 Open controle van prestaties

Het PI vertrouwt op gedeelde informatie over de prestaties van alle spelers binnen het PI, met de focus op belangrijke indicatoren zoals snelheid, betrouwbaarheid, en veiligheid. Een voorbeeld is een haven binnen het PI die openlijk informatie op het web plaats over de laadtijden voor de schepen, verblijfstijden van containers in de haven, levertijden etc. Om ervoor te zorgen dat deze informatie relevant is en vergelijkbaar, moeten er wereldwijde standaarden worden vastgesteld voor de prestatiebewaking van verschillende soorten entiteiten.

#### 1.1.10 Minimaliseren van fysieke verplaatsingen en opslag door het digitaal delen van kennis/data.

In het algemeen is het versturen van digitale objecten die informatie bevatten gemakkelijker, sneller en goedkoper dan het versturen van fysieke objecten. Het idee is dan ook om zo veel mogelijk producten te dematerialiseren tot informatie die kan worden gedeeld, waarna de fysieke materialisatie van de producten kan plaatsvinden op het moment van gebruik, wanneer dit nodig is. Om dit te bereiken moeten er meer flexibele fabrieken gebouwd worden die in staat zijn om verschillende soorten producten te maken. Deze fabrieken moeten worden aangesloten op het PI, zodat ze gemakkelijk kunnen communiceren met andere fabrieken en informatie kunnen delen. Zo kunnen producten gerealiseerd worden uit combinaties van digitaal verzonden specificaties en lokale fysieke objecten. Dit zal helpen bij het verbeteren van de manier waarop producten worden gemaakt en opgeslagen.

#### 1.1.11 Het stimuleren van nieuwe bedrijfsmodellen

Het PI vereist innovatieve bedrijfsmodellen voor het commercialiseren van nieuwe aanbiedingen die ermee mogelijk zijn gemaakt en eraan zijn aangepast. De opkomst van het PI heeft het potentieel om innovatie van bedrijfsmodellen te stimuleren in de logistiek, transport, detailhandel, service en productie-industrieën. Dit roept vragen op over hoe verschillende leveranciers en software systemen kunnen evolueren om het PI en zijn Global Open Supply Web het beste te benutten. De opkomst van het PI roept ook vragen op over welke nieuwe soorten bedrijfsmodellen de industrie zullen

domineren en wat de fysieke internet-geactiveerde equivalenten van Amazon, eBay en Google zullen zijn.

#### 1.1.12 Prioriteren van betrouwbaarheid en veerkracht van netwerken

Het digitale internet zendt niet alleen informatie van het ene punt naar het andere punt binnen het netwerk, maar zorgt er ook voor dat de informatie beschermd is tegen externe factoren, voornamelijk door gegevens in pakketten te encapsuleren. Binnen het PI wordt er ook gestreefd naar betrouwbaarheid van het netwerk en de containers. Het netwerk van netwerken en de grote hoeveelheid aan knooppunten zouden het PI in staat moeten stellen om zijn eigen robuustheid en veerkracht te waarborgen tegen onvoorziene gebeurtenissen. Als bijvoorbeeld een knooppunt of een deel van een netwerk uitvalt, moet het verkeer van n-containers zo automatisch mogelijk opnieuw kunnen worden gerouteerd.

#### 1.1.13 Het mogelijk maken van open infrastructurele innovatie

Het doel van het PI is om systemische samenhang en wereldwijde verbondenheid mogelijk te maken. Dit zal op zijn beurt het gebruik van zware behandeling, opslag en transportmiddelen die momenteel moeilijk in te zetten zijn vergemakkelijken. De gestandaardiseerde modulaire n-containers van het PI, die goederen bevatten, zorgen voor uniformiteit en maken een efficiëntere benutting van middelen mogelijk. Dit zal de capaciteit van infrastructuur vergroten door het benutten van standaardisatie, optimalisatie en automatisering, wat anders onbereikbaar zou zijn.

## 1.2 Planningsniveau's

In de literatuur worden planningsmodellen geclassificeerd op basis van de verschillende planningsniveau's. Het niveau kan strategisch, tactisch of operationeel zijn. In elk niveau wordt een verschillende tijdshorizon en soort beslissing toegepast. Hieronder wordt kort een omschrijving gegeven van de verschillende niveau's.

### Strategisch niveau

Op het strategische niveau vindt het ontwerp van het fysieke netwerk plaats. Ook is het hier noodzakelijk om de infrastructuur te specificeren en de investeringsbeslissingen te maken (Delbart et al., 2021). Belangrijke data zoals de transportvraag, het aantal flows tussen de oorsprong en de bestemming en de grootte van de verzending, worden hier verzameld. Voordat in infrastructuur kan geïnvesteerd worden, is het noodzakelijk dat de huidige infrastructuur en de beschikbare middelen onderzocht worden (Behdani et al., 2014). De tijdshorizon op dit niveau bedraagt 3 tot 5 jaar.

### Tactisch niveau

De tijdshorizon van tactische beslissingen is ongeveer 1 jaar. Het tactische niveau bepaalt de service (Delbart et al., 2021), wat wilt zeggen dat routes in het netwerk bepaald worden samen met de timing en het schema van de verschillende transportmodi. Bestellingen worden hier nog niet aan een specifieke route toegewezen. Het doel is om de capaciteit van het netwerk te illustreren, Ofwel, wat zijn de mogelijke paden in het netwerk. Daar komt nog bij dat de frequentie en de capaciteit van de verschillende transportmodi bepaald wordt. Als laatste wordt de mogelijkheid voor opslag of consolidatie van goederen in elke terminal bepaald. Data over het voorspelde vrachtvolume is nodig om de dienstverlening te ontwikkelen.

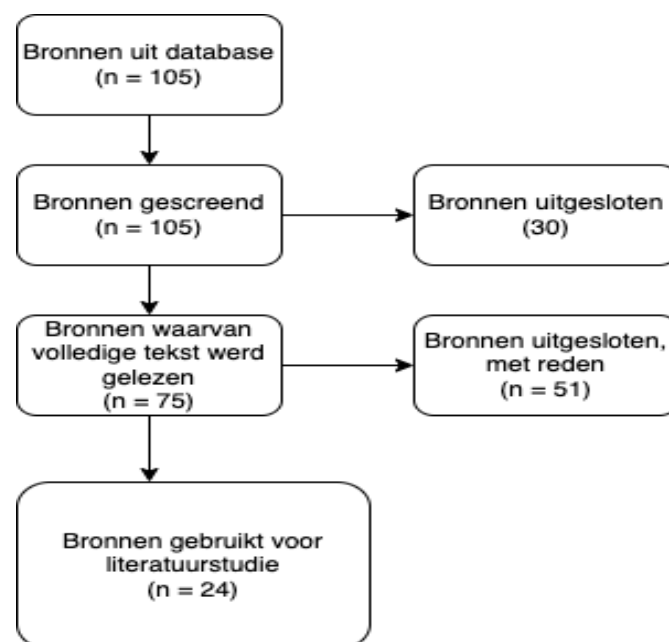
### Operationeel niveau

Bij het operationele niveau wordt het strategisch plan uitgewerkt tot een gedetailleerde routekaart die precies aangeeft welke acties er wekelijks en zelfs dagelijks genomen worden. In tegenstelling tot het strategische en tactische niveau worden operationele keuzes gemaakt in een gedetailleerde omgeving, waar informatie op containerniveau beschikbaar is (Delbart et al., 2021). Operationele problemen zijn bijvoorbeeld routeringsproblemen en het toewijzen van vracht aan een bepaalde vervoersdienst (Behdani et al., 2014).

## 1.3 Methodes

De methodologie die wordt gebruikt volgt de systematische literatuurstudie gepresenteerd door Durach, Kembro en Wieland (Durach et al., 2017). Deze paper geeft een leidraad voor gestructureerde literatuurstudies binnen het *supply chain* domein. De richtlijnen worden omschreven

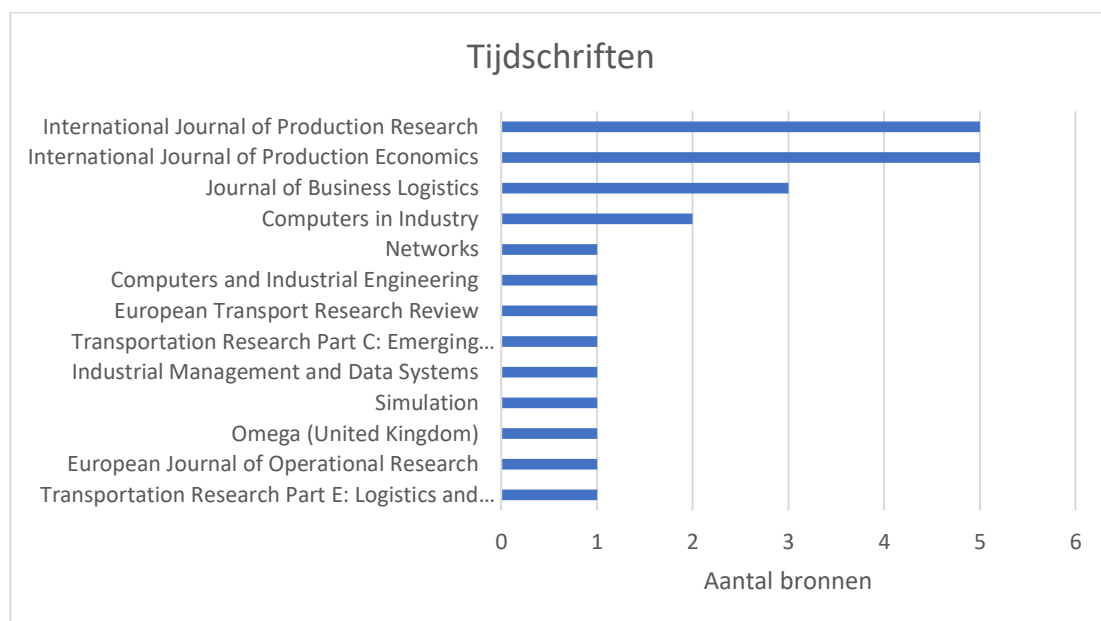
in zes stappen: (1) Het bepalen van de onderzoeksvraag en de focus van het onderzoek; (2) Het bepalen van de uitsluitingscriteria; (3) Het bepalen van zoekprocedures; (4) Het selecteren van belangrijke literatuur op basis van de uitsluitingscriteria; (5) Nuttige informatie halen uit de geselecteerde papers en (6) Het rapporteren van de resultaten. De onderzoeksvragen en de focus van de paper zijn al besproken in de inleiding. Voor deze literatuurstudie worden enkel Engelstalige artikels uit wetenschappelijke tijdschriften gebruikt. Om een goede kwaliteit van papers te garanderen worden enkel tijdschriften gebruikt die gerankt zijn volgens de 'journal impact factor' (JIF) binnen de web of science data base. De gebruikte elektronische databases zijn Scopus, Web of Science en Google Scholar. Aangezien in de literatuur het concept van het PI pas formeel werd gedefinieerd in 2013 door Montreuil, worden enkel papers vanaf het jaar 2013 gebruikt. De zoekprocedure voor Scopus zal nu kort worden beschreven. Er werd gezocht in de titel, abstract en de kernwoorden naar een combinatie van kernwoord "Physical Internet" met kernwoorden zoals; "model", "programming", "simulation", "decision support" en "decision making". Vervolgens werden de eerder vernoemde uitsluitingscriteria ingesteld bij de filter voor de resultaten. Deze zoekopdracht resulteerde in 105 bronnen. Het volledige selectieproces van de bronnen is gebaseerd op het PRISMA model, voorgesteld door (Moher et al., 2009) en wordt hieronder samengevat in (Figuur 2.)



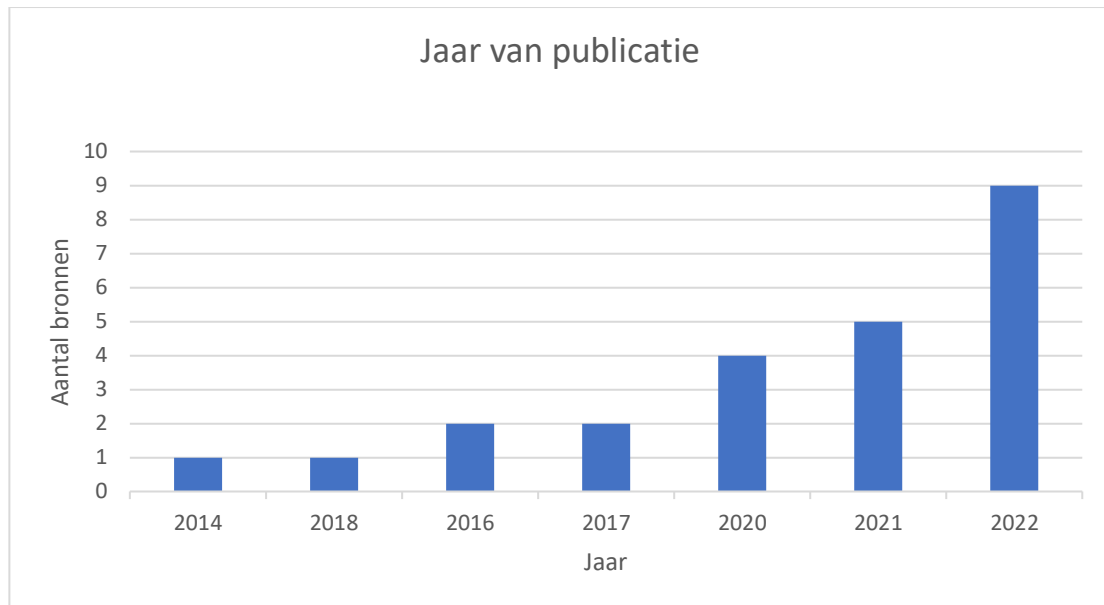
*Figuur 2. Selectieproces bronnen*

Om te beginnen werden de titel, abstract, sleutelwoorden, naam van het tijdschrift, naam van de auteurs, en het publicatiejaar van elk van de 105 bronnen naar een MS Excel spreadsheet geëxporteerd. Dit gaf een overzicht van de verzamelde literatuur om aan het selectieproces te beginnen. Als eerste werden de titels en abstracts van al de papers gescreend. Op basis hiervan werd bij een aantal bronnen duidelijk dat ze niet over het PI gingen in de logistieke zin, maar dat het woord "Physical Internet" in andere context gebruikt wordt. Daarnaast waren er ook bronnen die geen model uitwerkten of zelf literatuurstudies waren. Om deze redenen konden er 30 bronnen

worden uitgesloten. Op dat moment bleven er 75 bronnen over, waarvan enkel de titels en abstracts bekeken zijn. Bij sommige bronnen was het meteen duidelijk dat het nuttige literatuur was, anderen waren twijfelgevallen. Om deze redenen werd de volledige tekst van deze 75 bronnen bekeken. Deze keer werd er gekeken of de bronnen duidelijke beslissingen ondersteunden met hun modellen, of er methodes uit operationeel onderzoek werden toegepast, en of de tijdschriften waarin de bronnen werden gepubliceerd gerankt zijn volgens de 'Journal impact factor' (JIF) in de 'Web of Science' database. Op basis van deze criteria werden er 44 bronnen uitgesloten. Dit resulteerde in 24 bronnen die gebruikt zijn voor de literatuurstudie. In figuur 3 wordt het aantal bronnen per gebruikt wetenschappelijk tijdschrift weergegeven. Hieruit valt op dat negen tijdschriften slechts één keer voorkomen. De meeste bronnen komen uit de eerste drie tijdschriften in de figuur. Dit is echter logisch, aangezien deze tijdschriften bekende logistieke tijdschriften zijn. Tot slot geeft figuur 4 weer in welk jaar de bronnen werden gepubliceerd. Hieruit kan worden opgemerkt dat er de afgelopen acht jaar een stijgende trend is naar onderzoek rond het PI, met een duidelijke stijging in de jaren 2020 tot 2022.

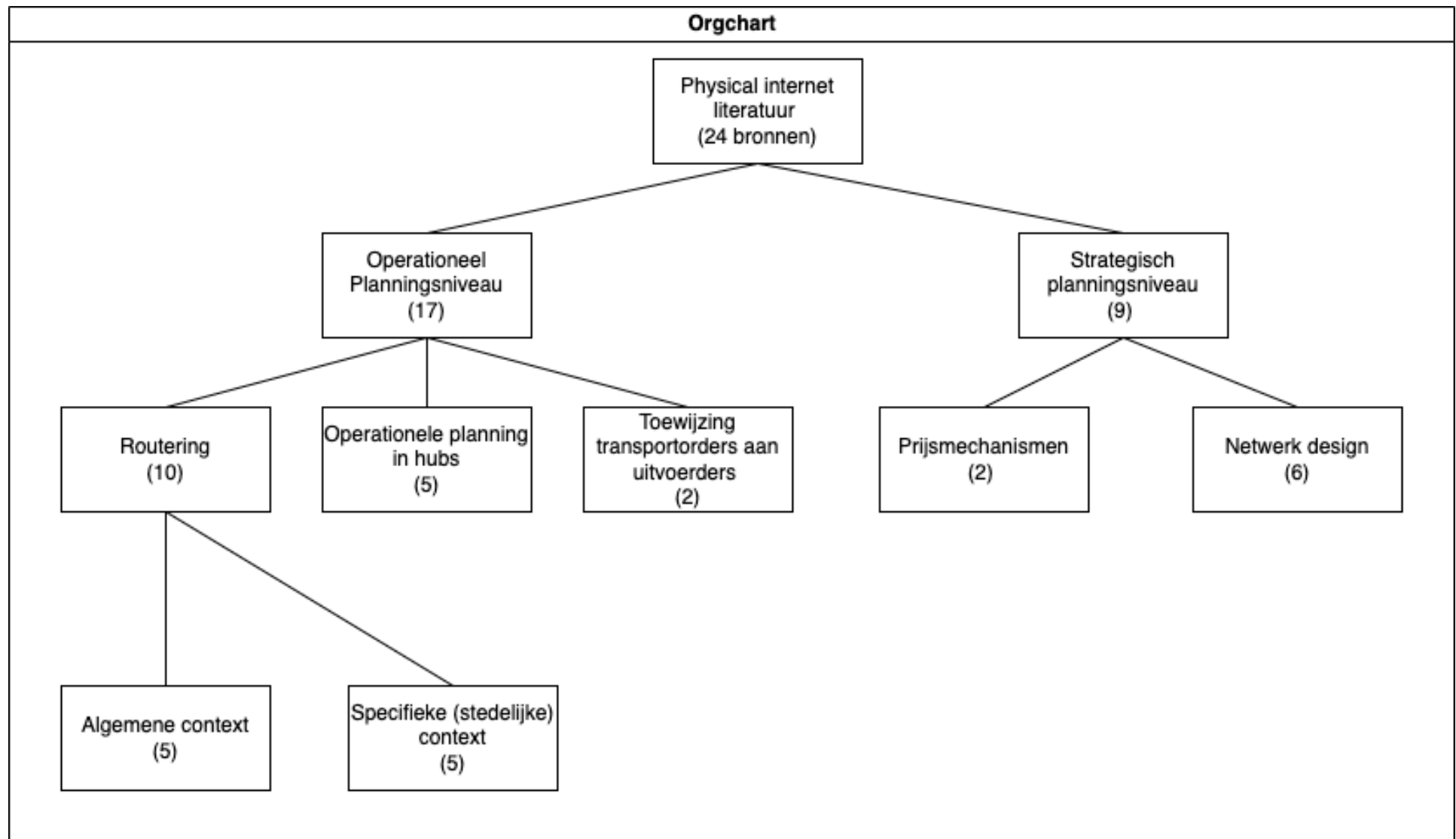


*Figuur 3. Aantal bronnen per tijdschrift*



*Figuur 4. Aantal bronnen per jaar van publicatie*

Om deze 24 bronnen te analyseren en tot waardevolle resultaten te komen, worden ze eerst opgedeeld in verschillende hoofd- en subcategorieën. De reden hiervoor is dat voor deze thesis het niet nuttig leek om resultaten uit bronnen te vergelijken die over volledig verschillende logistieke problemen in verschillende contexten gaan. Door categorieën te maken en de bronnen per categorie te bespreken kunnen er conclusies worden gemaakt over specifieke problemen en kunnen de bronnen beter onderling vergeleken worden. De classificatie van de literatuur is weergegeven in figuur 5. Deze figuur is bedoeld om een overzicht te geven van de gemaakte categorieën, samen met het aantal bronnen in elke categorie. De beschrijving van elke categorie en de lijst van bronnen die er deel van uitmaken worden besproken in de volgende secties. Het is wel belangrijk al te vermelden dat 'Strategisch/Tactisch planningsniveau' en 'Operationeel planningsniveau' in deze thesis de hoofdcategorieën worden genoemd. De rest van de categorieën worden subcategorieën genoemd. Uit de figuur kan ten eerste worden opgemerkt dat de subcategorieën 'routing', 'Operationele planning in hubs' en 'Netwerk design' de meeste literatuur bevatten, met respectievelijk tien, vijf en zes bronnen. Deze zullen dus voornamelijk worden geanalyseerd. Als laatste wordt er opgemerkt dat er twee bronnen zijn, namelijk (Ghaderi et al., 2022) en (Luo et al., 2022), die in beide hoofdcategorieën worden besproken.

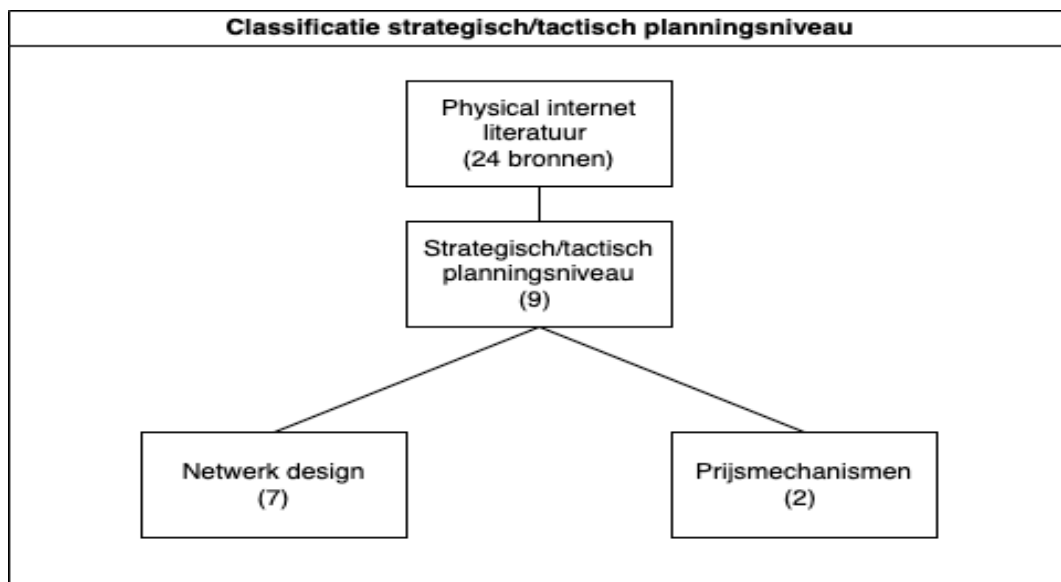


*Figuur 5. Classificatie van de literatuur*

## 2. Strategisch/tactisch planningsniveau

In deze sectie wordt de literatuur besproken die kan worden geclassificeerd onder het strategisch/tactisch planningsniveau. In sectie 1.2 werden het strategische en het tactische planningsniveau apart besproken. Voor het classificeren van de papers worden deze niveaus echter samengebracht in deze thesis. De reden is dat het in de literatuur vaak niet duidelijk is of het enkel over een strategisch of een tactisch niveau gaat. De tijdshorizon van deze categorie gaat dus van één jaar (tactisch) tot vijf jaar (strategisch).

Om de verzamelde literatuur te structureren worden er verschillende subcategorieën gemaakt. Deze structuur wordt volledig weergegeven in onderstaande figuur (figuur 6), en zal hier verder worden uitgelegd. Van de 24 bronnen die in totaal verzameld zijn, zijn er negen bronnen die een strategisch/tactisch planningsniveau bespreken. Dit wil zeggen dat in deze papers ofwel volledig ofwel deels gefocust wordt op strategische of tactische beslissingen en/of modellen. Het valt meteen op dat dit aanzienlijk minder is dan het operationeel planningsniveau, met als gevolg dat het strategische/tactische planningsniveau in mindere maten zal worden besproken. Deze negen bronnen worden verder opgedeeld in drie subcategorieën, gebaseerd op welk soort probleem er besproken wordt. De eerste en grootste subcategorie, die bestaat uit zeven bronnen, is 'netwerk design'. De tweede categorie is 'prijsmechanismen' en bevat twee bronnen. In de volgende secties zal de verzamelde literatuur per subcategorie worden besproken. In de beschrijving van de bronnen worden eerst en vooral de context en het besproken probleem kort samengevat. Er wordt vervolgens aangehaald welke beslissingen er moeten worden genomen en wie de beslissingsnemer(s) is (zijn).



*Figuur 6. Classificatie van de literatuur in het strategisch/tactisch planningsniveau.*

Onderstaande tabel (tabel 1) geeft een kort overzicht van de verzamelde literatuur, ingedeeld per categorie (in het strategische/tactische niveau).

| NETWERK DESIGN              | PIJSMECHANISMEN     |
|-----------------------------|---------------------|
| Ghaderi et al., (2022)      | Bae et al., (2022)  |
| Kulkarni et al., (2022)     | Qiao et al., (2020) |
| Dong & Franklin, (2021)     |                     |
| Krogsgaard et al., (2018)   |                     |
| Luo et al., (2022)          |                     |
| Sternberg & Denizel, (2021) |                     |
| (Ambra et al., 2021)        |                     |

*Tabel 1. Literatuur per categorie (tactisch/strategisch planningsniveau)*

## 2.1 Network Design

De zeven bronnen die gefocust zijn rond netwerk design zullen hier besproken worden. Network Design bepaalt de fysieke configuratie en infrastructuur van de toeleveringsketen. Belangrijke beslissingen rond het aantal, de locatie en de grootte van bijvoorbeeld magazijnen worden hier genomen. Twee veel voorkomende problemen zijn locatieproblemen en transportproblemen (bron: TUM school of management). Met locatieproblemen wordt bedoeld het bepalen van locaties voor verschillende toepassingen op knooppunten in een netwerk, bijvoorbeeld magazijnen.

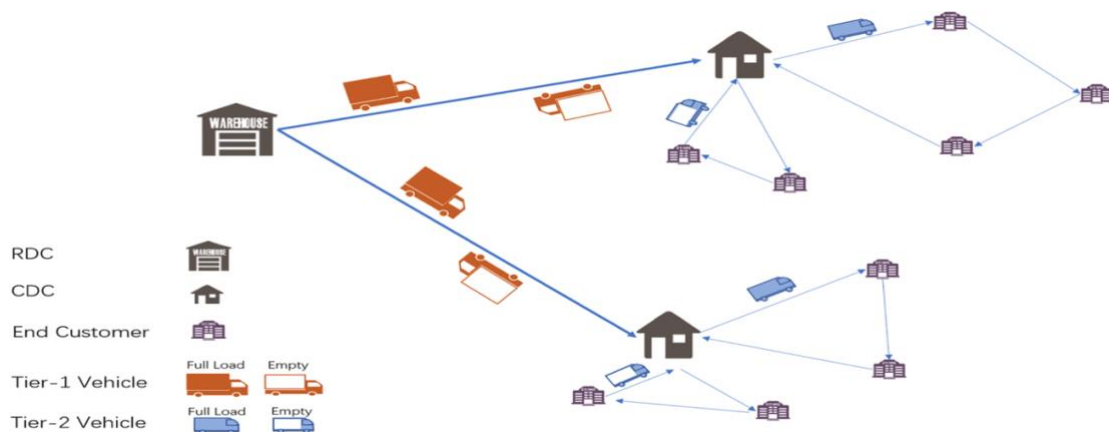
(Ghaderi et al., 2022) bespreken bijvoorbeeld een locatieprobleem. Er wordt gekeken naar een crowdshipping systeem waarin een online platform leveringsaanvragen binnenkrijgt en vervolgens gepaste crowdshippers (CS) identificeert, die hun interesse voor het uitvoeren van leveringen hebben geregistreerd. De CS haalt het pakket op bij de oorsprong, en brengt het naar de gewenste locatie. De CS wordt hiervoor dan betaald. Uit de literatuurstudie die uitgevoerd wordt in de paper blijkt dat het meeste onderzoek naar optimalisatie binnen zo een systeem beperkt is tot 1 taak voor 1 CS. Deze paper wil bijdragen aan de literatuur door de mogelijkheden voor onderling verbonden

crowdshipping systemen waarin wordt samengewerkt te onderzoeken. Dit wil zeggen dat één taak kan worden uitgevoerd door meerdere CS's tegelijk, en tussentijdse overdrachten gebeuren doormiddel van parcel lockers. Dit wordt omschreven als 'joint delivery'. Het strategische probleem dat wordt onderzocht in deze paper is het identificeren van de beste locaties voor het opstellen van parcel lockers die moeten dienen als overdrachtpunten voor 'joint delivery'. Dit probleem wordt geclassificeerd onder strategisch planningsniveau aangezien het gaat over het fysiek ontwerp van een netwerk. Er wordt een lineair programmeringsmodel geformuleerd om dit probleem op te lossen. Dit model is in staat om tot een optimale oplossing (dus exact) te komen voor kleine instanties. Voor grotere instanties wordt een 2-fase algoritme ontwikkeld, waarbij de eerste fase de taken in sets verdeelt, en de tweede fase de mogelijke locaties van de lockers rangschikt gebaseerd op het gebruik bij de 'joint delivery'.

Ook (Kulkarni et al., 2022) beschrijven een dergelijk locatieprobleem. Dit probleem gaat over een logistiek bedrijf dat als doel heeft een veerkrachtig, hyper-verbonden, intercity logistiek hub netwerk te ontwikkelen om goederen te transporteren tussen sets van oorsprongen en bestemmingen. Veerkrachtigheid en hyper-connectiviteit zijn belangrijke kenmerken van het PI (Montreuil, 2011). Een voorbeeld van zo een netwerk, dat in de paper ook als case study wordt onderzocht, is een logistiek hub netwerk voor grondtransport en consolidatie van pakketten tussen Chinese steden. Verschillende bedrijven die pakketten bezorgen kunnen gebruik maken van zo een netwerk om dagelijks miljoenen pakketten te leveren. Het gaat hier om het ontwerp van een netwerk en dus kan dit artikel geclassificeerd worden onder strategisch planningsniveau. In de paper worden twee modellen ontwikkeld om het ontwerp te ondersteunen die zijn gebaseerd op de beslissing van locaties voor het plaatsen van hubs. Er worden twee integrale programmeringsmodellen ontwikkeld om zo een netwerk te modelleren. In het eerste model wordt het volgende probleem gedefinieerd: het selecteren van hubs om te openen om zo elk oorsprong-bestemmingspaar (O-B paar) te verbinden met meerdere 'shortest paths' terwijl ook de hyperconnectiviteit gegarandeerd blijft. In het tweede model wordt het verbinden van elk O-B paar met meerdere 'shortest edge-disjoint paths' als probleem gedefinieerd. "Edge-disjoint paths" zijn paden die geen gemeenschappelijke verbindingen delen. Met andere woorden, het zijn paden die geen overlappende verbindingen hebben. Deze paden zijn nuttig in verschillende toepassingen, zoals netwerkrouting, waarbij je meerdere paden wilt vinden tussen twee punten die geen fysieke verbindingen delen. In beide modellen gaat de beslissing over de locaties van de hubs. Het doel van deze modellen is om de impact op reistijd te verminderen en de connectiviteit tussen O-B paren te behouden na eventuele verstoringen van het netwerk. Voorbeelden van verstoringen zijn zowel frequente evenementen als stroomuitval en filles, als minder voor de hand liggende evenementen zoals natuurrampen, pandemiën en (terroristische) aanvallen. Beide modellen zijn in staat een optimale oplossing te bekomen voor kleine gevallen. Het eerste model wordt echter geformuleerd op basis van mogelijke paden in het netwerk en wordt bijgevolg ingewikkeld om te formuleren voor zeer grote en complexe netwerken. Om dit probleem op te lossen wordt een 'matheuristic' of algoritme ontwikkeld dat op een iteratieve manier hetzelfde IP-model oplost maar op een kleinere schaal om zo tot kwaliteitsvolle oplossingen te komen binnen een acceptabele tijd.

(Luo et al., 2022) bespreken ook deels een gelijkaardig probleem waarbij de locaties van de  $\Pi$ -hubs moeten bepaald worden. Het doel van deze paper is om een operationeel model binnen de stadslogistiek te ontwerpen voor nieuwe detailhandel, en zal om deze reden dus ook worden besproken bij de categorie 'Operationeel planningsniveau'. Dit wil echter niet zeggen dat de beslissingen die ondersteund worden enkel van operationele aard zijn, zoals verder duidelijk zal worden. Deze nieuwe detailhandel, die wordt gekenmerkt door omnichannel, gefragmenteerde bestellingen en gedecentraliseerde 2C-distributie, wordt wereldwijd de standaard van de detailhandel. 2C staat voor 'to customer', waarmee de eindconsument wordt bedoeld. In de vroege stages van B2C (business to consumer) e-commerce, was de proportie van leveringen aan de eindconsument binnen stadslogistiek vrij klein. Deze proportie is in de huidige detailhandel aanzienlijk gestegen. Een tweeledige stadslogistieke oplossing binnen het PI wordt voorgesteld door de belangrijkste voorzieningen in stadslogistiek opnieuw te definiëren met het  $\Pi$ -concept.

In het klassieke tweeledige model worden ladingen die aankomen via diverse transportsystemen eerst gesorteerd en geconsolideerd bij het magazijn (RDC in figuur 7) in de buitenste laag. De samengevoegde ladingen worden vervolgens in grote tier 1-voertuigen geladen en naar kleinere faciliteiten (CDC in de figuur) dicht bij het stadscentrum gebracht. Ladingen worden vervolgens overgeladen in kleinere tier 2-voertuigen, geschikt voor activiteiten in het stadscentrum, en worden geleverd aan de eindklanten. In dit model loopt het tier-1 transport elke dag van RDC naar CDC. De CDC is een vaste faciliteit in het kerngebied van de stad en heeft als belangrijkste functies cross docking en kortetermijnopslag.



*Figuur 7. Klassiek model. (Luo et al., 2022)*

Dit model wordt echter aangepast aan het PI. De tweeledige stadslogistieke oplossing met PI is gebaseerd op twee belangrijke kenmerken van PI. De eerste is de aanwezigheid van een open en standaard hub in de webarchitectuur van een stad en het onderling verbinden van de logistieke centra. Een andere is de inkapseling van goederen in standaard, modulaire, slimme en herbruikbare  $\Pi$ -containers die over open distributienetwerken worden gerouteerd (Montreuil et al., 2013).

In de voorgestelde  $\Pi$ -oplossing worden de bestellingen die de eindklant nodig heeft, geconsolideerd en in de  $\Pi$ -container geladen in het magazijn. Het tier-1  $\Pi$ -voertuig, dat meerdere  $\Pi$ -containers kan vervoeren, bezoekt vanuit het magazijn meerdere  $\Pi$ -hubs in een lus. Wanneer het  $\Pi$ -voertuig bij een  $\Pi$ -hub aankomt, zet deze de volle container neer en gaat direct naar de volgende  $\Pi$ -hub. Indien nodig worden de lege containers tijdens de lus opgehaald en teruggebracht naar het magazijn. Hier wordt dus ook rekening gehouden met herpositionering van lege containers, wat overeenkomt met het model van (Li et al., 2022). Daar was het echter zo dat de lege containers gebruikt werden om extra transportaanvragen te voltooien, hier worden de lege containers enkel opgehaald. Het kan eventueel een goede optie zijn om beide modellen te combineren in toekomstig onderzoek. Het Tier 2  $\Pi$ -voertuig vervoert slechts één  $\Pi$ -container en is verantwoordelijk voor het ophalen van de  $\Pi$ -container van de  $\Pi$ -hub en het één voor één leveren aan de eindklant die onder de  $\Pi$ -hub valt. In deze oplossing kan tier-1 en tier-2 transport asynchroon worden uitgevoerd waardoor de voertuigen niet meer hoeven te wachten bij de  $\Pi$ -hub (dit is het geval in het klassieke tweeledige model, dus zonder PI elementen).

De belangrijke strategische beslissingen die genomen worden zijn dus; Het definiëren van het aantal en de locaties van de  $\Pi$ -hubs, wat valt onder netwerk design. De operationele beslissingen zullen verder in sectie 3 besproken worden. Er wordt een wiskundig model van de voorgestelde oplossing opgesteld. Een algoritme wordt ontworpen op basis van een iteratieve procedure, die zorgt voor consistente en optimale resultaten.

In de verzamelde literatuur gaat het echter niet altijd noodzakelijk over het plaatsen van hubs/magazijnen/parcel lockers.

Zo bespreken (Krogsgaard et al., 2018) het ontwerp van een lijnvaart netwerk. Lijnvaart is een dienst die door rederijen (schepen van een onderneming die onder gemeenschappelijke naam in de vaart zitten) wordt aangeboden, waarbij schepen volgens een vast schema varen tussen vaste havens. Dit in tegenstelling tot de wilde vaart waarbij er gevaren wordt naar waar er ladingen worden aangeboden. Vooral in de containersector wordt vaak gebruikgemaakt van vaste lijnvaartroutes. Hier gaat het niet zo zeer over selectie van locaties maar over het ontwerpen van de routes die de schepen kunnen nemen met winstmaximalisatie als doel. In dit artikel wordt een heuristiek ontwikkeld voor het oplossen van het Liner Shipping Network Design Problem (LSNDP), zonder een al bestaand netwerk als startpunt. Het doel is om de winst te maximaliseren die bestaat uit de omzet verminderd met de operationele kosten. Een lijnvaartnetwerk bestaat uit een aantal rotaties, een geplande rondvaart tussen een reeks havens. Rotaties worden bij voorkeur wekelijks uitgevoerd, al zijn er ook voorbeelden van tweewekelijkse rotaties te vinden. Een rotatie wordt uitgevoerd door een aantal schepen om de gewenste frequentie te bereiken. De meeste bestaande algoritmes voor LSND ontwerpen eerst de routes die de schepen kunnen nemen, en sturen dan de containers door het netwerk om te berekenen hoeveel vraag kan volbracht worden en wat de operationele kosten zijn. In deze paper worden de twee stappen omgedraaid. De containers worden namelijk eerst door een vereenvoudigd netwerk gestuurd, waarna de gepaste routes ontworpen worden. De vereenvoudiging van het netwerk betekent dat er bepaalde beperkingen worden

weggelaten. Dit zou moeten zorgen voor een betere initiële oplossing en reflecteert het concept van PI waarin gebruik kan worden gemaakt van multi-segment intermodaal transport. Om een scheepvaartnetwerk te kunnen exploiteren, moet worden besloten hoe de containers moeten worden vervoerd, welke containers op welke schepen moeten gaan, waar overslag plaatsvindt enz. De containers delen de capaciteit van de schepen, maar hebben een unieke herkomst en bestemming, en het is dus noodzakelijk om een multicommodity flow problem (MCF) op te lossen. Het probleem wordt opgelost door eerst een initieel netwerk te ontwerpen. Vervolgens wordt gebruik gemaakt van een verbeteralgoritme dat gebaseerd is op 'variable neighborhood search'. Hierna worden de MCF's opgelost met behulp van een 'fast Lagrange' heuristiek. Deze heuristiek ligt slechts 2-5% van de optimale oplossing. Tenslotte wordt er een repair-flow algoritme toegepast om een bruikbare flow in het netwerk te krijgen. De oplossing voor het netwerkmodel is in het algemeen dus een heuristische oplossing.

(Dong & Franklin, 2021) merken op dat, hoewel de academische interesse en de financiële steun van het PI sterk gestegen zijn de afgelopen jaren, er bijzonder weinig duidelijkheid is over de operationaliteit en de implementatie ervan. In deze paper wordt er een algemeen netwerkmodel opgesteld dat de operationaliteit van het PI moet kunnen ondersteunen. Er wordt opgemerkt dat er binnen het PI twee belangrijke beslissingen zijn die moeten ondersteund worden door zo een model. De eerste is het bereikbaarheidsprobleem, dat zegt hoe een voorwerp van punt A naar punt B moet geraken. De tweede is een moeilijker optimalisatieprobleem, namelijk hoe kunnen kosten, uitstoot, en tijd voor een bepaalde levering op dynamische manier geoptimaliseerd worden. Zoals eerder al aangehaald werd is het concept van het PI gebaseerd naar analogie op het digitale internet. In deze paper wordt eerst dieper ingegaan op deze analogie om duidelijk te maken welke belangrijke verschillen er bestaan tussen de twee. Hieruit wordt geconcludeerd dat het PI verschillende unieke kenmerken bevat die zeker in het model moeten worden opgenomen zoals de verschillende participanten waaruit het PI bestaat ( $\Pi$ -hubs,  $\Pi$ -movers,  $\Pi$ -containers etc.), de logistieke meetstaven zoals kost, tijd en uitstoot, en de unieke aard van verzendingen. De auteurs merken op dat hoewel de context van het netwerkmodel het PI is, de wiskundige structuur ervan gelijkenissen toont met de structuur van klassieke transportproblemen in de literatuur. Het model is vooral vergelijkbaar met modellen van het kortste pad probleem (shortest path problem) en het dynamische transportprobleem. Het kortste pad probleem bestudeert hoe een reiziger een kortste route vindt (in termen van kosten, tijd, emissies, enz.) tussen twee knooppunten van een transportnetwerk. In de loop van de jaren zijn er verschillende uitbreidingen van dit probleem ontwikkeld. Zo kunnen de parameters bijvoorbeeld tijdsafhankelijk zijn. Terwijl elke reiziger onafhankelijk zijn/haar optimalisatie van het kortste pad beheert, kunnen de gezamenlijke acties van alle reizigers onbedoeld leiden tot congestie in het transportnetwerk en uiteindelijk voorkomen dat de reizigers hun optimaliteit bereiken. Modellen voor dynamische transportproblemen kunnen evenwichten bereiken in zo een situatie. Het PI komt duidelijk overeen met zo een situatie aangezien er met een groot aantal spelers (transportbedrijven) rekening moet worden gehouden, en wanneer dit niet gebeurt, er dus ook congestie kan ontstaan. Het model moet dus ten eerste het optimalisatieprobleem op individueel niveau kunnen oplossen, en dan de kennis van al de verschillende individuele problemen samenbrengen om zo het netwerk te beheren. Er wordt een

twee-fase heuristiek voorgesteld om tot oplossingen to komen. In de eerste fase wordt het bereikbaarheidsprobleem opgelost, waar alle mogelijke verbindingen van punt A naar B in het netwerk worden geïdentificeerd. De tweede fase lost het optimalisatieprobleem op; uit alle mogelijke verbindingen wordt degene geselecteerd die aan alle maatstaven van de beslissingsnemer (transportbedrijf) voldoet.

De laatste twee bronnen die in de 'netwerk design' categorie worden besproken, verschillen van overige bronnen aangezien ze niet specifiek gaan over locatieproblemen of transportproblemen binnen de netwerken.

(Sternberg & Denizel, 2021) onderzoeken het effect van het ontwerp en karakteristieken van  $\Pi$ -containers op de flow van deze containers in de context van een binnelands netwerk (domestic network). Specifiek stelt de paper de vraag of het niveau van 'service modularity' (ofwel de compatibiliteit van  $\Pi$ -containers in regionaal transport) effect heeft op de flow en herpositionering van  $\Pi$ -containers in het netwerk. Onevenwichtige flows tussen verschillende regio's in het netwerk en dus de behoefte aan het balanceren van flows van  $\Pi$ -containers wordt verwacht zoals in elk systeem. In het PI zouden de containers door alle logistieke bedrijven gemeenschappelijk moeten worden gebruikt. Dit maakt de herpositionering van  $\Pi$ -containers in theorie eenvoudiger, maar nog steeds noodzakelijk vanwege incompatibele vrachttypes en handelsonevenwichtigheden tussen de geografische gebieden waar de  $\Pi$ -hubs zich bevinden. Er wordt een strategische analyse van de totale volumes van vracht en  $\Pi$ -containers in een terminal-naar-terminalnetwerk gemaakt. De resultaten zijn bedoeld om strategische inzichten te vormen met betrekking tot de effecten van  $\Pi$ -adoptie (specifiek het gebruik van  $\Pi$ -containers) voor supply chain managers en beleidsmakers. Dit kan beslissingen rond container ontwerp en modulariteit ondersteunen. Bijvoorbeeld: hoeveel verschillende  $\Pi$ -containers moeten er ontworpen worden in een bepaald logistiek netwerk om herpositionering van lege trucks te minimaliseren en zo dus ook de onevenwichtigheden. Het model heeft dus als doelfunctie het minimaliseren van onevenwichtigheden in  $\Pi$ -container flows tussen verschillende  $\Pi$ -hubs. Het model is algemeen genoeg om om het even welk aantal knooppunten en types vracht te modelleren. Er worden dan ook 4 versies van het model opgebouwd, waarin verschillende niveaus van container compatibiliteit worden toegepast. Dit gaat van perfecte compatibiliteit (alle vrachttypes kunnen worden gecombineerd zodat er maar één type  $\Pi$ -container is) naar geen compatibiliteit (elk vrachttype moet apart vervoerd worden in verschillende types  $\Pi$ -containers). De resultaten worden berekend met vrachtdata uit Zweden. Het beste scenario (perfecte compatibiliteit) geeft een flow onevenwichtigheid die significant beter is (7%) ten opzichte van de huidige situatie (standaard huidig logistiek systeem). In de paper worden exacte oplossingen gegeven voor het LP-model.

Als laatste wordt door (Ambra et al., 2021) de nadruk op het transparant maken van logistieke netwerken gelegd zodat ze toegankelijk zijn voor verschillende gebruikers zoals verladers en vervoerders. Gebruikers kunnen verbinding maken met het  $\Pi$ -netwerk en bestellingen plaatsen, die vervolgens worden toegewezen aan de dichtstbijzijnde beschikbare transportdienst en naar de afzender worden gebracht. Het gebruik van andere bestaande netwerken vereist een zekere mate

van transparantie, zodat een dergelijk netwerk in eerste instantie kan worden geïdentificeerd. In dit opzicht maakt het Internet of Things (IoT) verbinding met objecten via het internet en mobiele netwerken. In de paper wordt dit soort netwerk benaderd via verschillende geo-platformen die GPS-apparaten en sensorinformatie integreren in een server die vervolgens de ruimtelijke en temporele kenmerken (locatie, afstand, snelheid etc.) van objecten (voertuigen, pakketten, distributiecentra) verwerkt en andere objecten in de omgeving detecteert. Op deze manier kan de transparantie van het netwerk worden gesimuleerd, aangezien ervan wordt uitgegaan dat voertuigen in het netwerk voorzien zijn van sensoren en de mogelijkheid hebben om informatie te delen met hun omgeving via IoT en gps-toepassingen

## **2.2 Prijsmechanismen gebaseerd op veilingen**

De overige twee papers, namelijk (Bae et al., 2022). en (Qiao et al., 2020) bespreken vormen van prijsmechanismen gebaseerd op veilingen. Prijsmechanismen omschrijven de werking tussen vraag (transportaanvragen) en aanbod (verladers), met als uitkomst een prijs. Om snel over prijzen te kunnen onderhandelen, worden veilingen vaak gezien als een handig mechanisme. Ze zijn betrouwbaar en kunnen, indien ze goed ontworpen en geïmplementeerd zijn, in zeer korte tijdscycli worden uitgevoerd. Ze hebben ook erg mooie eigenschappen als ze eenmaal worden uitgevoerd, en ondanks dat ze deze eigenschappen verliezen en moeilijker te analyseren zijn in herhaalde omgevingen, weten we dat ze nog steeds goed kunnen werken door hun uitgebreide gebruik bij de verkoop van online advertenties. Ze zijn echter buitengewoon moeilijk te implementeren in de complexe omgevingen van internationale toeleveringsoperaties, wat wordt opgemerkt door de grote hoeveelheden zendingen en talrijke routeringsknooppunten. De volgende papers proberen dit probleem aan te pakken.

(Bae et al., 2022) ontwikkelen zo een prijsmechanisme als onderdeel van hun hybride model dat moet dienen om het probleem van horizontale samenwerking in vrachttransport op te lossen. Deze paper draagt bij aan de literatuur door een geïntegreerd model (nieuw model) te ontwikkelen op een operationeel niveau (network flow) en een strategisch niveau (prijsmechanisme op basis van veiling). De methode wordt gebruikt om een stedelijk gebied te modelleren waarin verschillende logistieke clusters dienen als hubs voor verschillende transportnetwerken met meerdere magazijnen die bestuurd worden door e-commerce bedrijven. Het veilingsprotocol voor het prijsmechanisme moet dienen als communicatie tussen verladers en transportbedrijven. De biedprijs wordt bepaald als functie van travel cost en truckload fill rate. Verladers sturen transportverzoeken uit en vervoerders bieden daarop in een veiling waarbij containers worden toegewezen aan vrachtwagens op hubs binnen een bepaald tijdsvenster. Het veilingsproces houdt rekening met de resterende capaciteit van trucks bij het bepalen van de winnaar met de meeste kostenbesparingen. In de paper wordt een algoritme uitgeschreven dat alle stappen van het veilingsproces bevat. In het algoritme moet een winnaar bepaald worden. Deze beslissing wordt ondersteund door een wiskundig model op te stellen, namelijk het 'winner determination program' of WDP. Dit programma wordt opgelost met CPLEX en geeft dus een exacte oplossing.

(Qiao et al., 2020) definiëren en onderzoeken een beslissingsprobleem bestaande uit less-than-truckload dynamic pricing (LTLDP) in de context van het PI. Het PI wordt omschreven als een 'spot freight market', waar 'less than truckload' (LTL) transport aanvragen met verschillende volumes en bestemmingen continu aankomen en slechts korte tijd verblijven. De transportaanvragen in  $\Pi$ -hubs zijn dus zeer stochastisch. Vervoerders kunnen een prijs bieden om de transportaanvragen te winnen doormiddel van korte termijncontracten. Eens de prijzen zijn verstuurd, worden de aanvragen optimaal verdeeld onder de vervoerders. De beslissing die moet gemaakt worden is dus welke prijs de vervoerders moeten bieden om zo hun winst te maximaliseren, en is dus gelijkaardig met de beslissing van (Bae et al., 2022). Hier wordt rekening gehouden met de aangevraagde hoeveelheid, de capaciteit van de transportbedrijven en de transportkost. Om deze beslissing te ondersteunen, wordt een dynamisch prijsmodel ontwikkeld gebaseerd op een veiling mechanisme om de biedprijzen te optimaliseren. Het model wordt geschreven als een dynamisch programmeringsmodel (DP). Dit is een wiskundig geformuleerd model waarmee exacte oplossingen kunnen berekend worden.

## 2.4 Oplossingsmethoden

Onderstaande tabel geeft kort weer welke oplossingsmethoden er worden gebruikt voor de modellen in de literatuur, en of deze oplossingen werden getest aan de hand van een gevalstudie (gebaseerd op het echte leven) of een 'numerical example' (fictieve gegenereerde data).

| Authors                  | Exact | Heuristiek/algorithm | Simulatie | Case study | numerical example |
|--------------------------|-------|----------------------|-----------|------------|-------------------|
| <b>Network design</b>    |       |                      |           |            |                   |
| Ghaderi H. et al. 2022   | x     | x                    |           |            |                   |
| Kulkarni et al. 2022     |       | x                    |           | x          |                   |
| Luo et al. 2022          |       |                      | x         |            |                   |
| Ambra T. et al. 2021     |       |                      |           | x          |                   |
| Dong & Franklin 2021     | x     | x                    |           |            |                   |
| Krogsgaard et al. 2018   |       | x                    |           |            |                   |
| <b>Prijsmechanismen</b>  |       |                      |           |            |                   |
| Bae et al. 2022          | x     | x                    |           |            | x                 |
| Qiao et al. 2020         | x     |                      |           |            | x                 |
| Sternberg & Denizel 2021 | x     |                      |           |            |                   |

Tabel 1. Oplossingsmethoden voor modellen in het strategisch/tactisch planningsniveau.

## 2.5 $\Pi$ -kenmerken op strategisch niveau

Tabel 2 geeft een overzicht van de voornaamste kenmerken en eigenschappen van het PI die worden toegepast in de papers die behoren tot het strategische niveau. Deze kenmerken zijn gebaseerd op de enkele van de 13 kenmerken genoemd door (Montreuil, 2011), die eerder al besproken werden. De eerste drie kolommen gaan over de  $\Pi$ -elementen ( $\Pi$ -container,  $\Pi$ -voertuig en  $\Pi$ -hub) die ook eerder werden omschreven in de inleiding. Deze zullen vanaf hier samen worden gezet onder de naam 'infrastructuur'. In sommige papers worden al deze elementen gebruikt, in andere deels en

soms worden ze zelfs niet expliciet vermeld. De kolommen die daarop volgen bevatten bepaalde eigenschappen die herhaaldelijk aan bod komen in de verschillende bronnen. Onder de tabel zal worden besproken hoe de auteurs deze eigenschappen toepassen om modellen te creëren die het PI representeren. Dit kan in de vorm van bepaalde assumpties zijn, maar ook in de manier waarop netwerken worden gemodelleerd, zoals verder duidelijk zal worden. Ook wordt er vermeld wat de gevolgen zijn van het meenemen van deze kenmerken in de modellen, als dit werd vermeld in de paper.

| Authors                  | Π-hubs | Π-containers | Π-voertuig | Network Resilience | interconnectivity/<br>open web | dynamisch | collaboration |
|--------------------------|--------|--------------|------------|--------------------|--------------------------------|-----------|---------------|
| <b>Network design</b>    |        |              |            |                    |                                |           |               |
| Ghaderi H. et al. 2022   | x      |              |            |                    | x                              |           | x             |
| Kulkarni et al. 2022     | x      |              |            | x                  | x                              |           | x             |
| Luo et al. 2022          | x      | x            | x          |                    | x                              |           |               |
| Ambra T. et al. 2021     |        |              | x          |                    | x                              | x         |               |
| Dong & Franklin 2021     |        | x            |            | x                  | x                              | x         |               |
| Krogsgaard et al. 2018   |        |              |            |                    | x                              |           |               |
| Sternberg & Denizel 2021 |        |              |            |                    |                                |           |               |
| <b>Prijsmechanismen</b>  |        |              |            |                    |                                |           |               |
| Bae et al. 2022          |        |              |            |                    | x                              |           | x             |
| Qiao et al. 2020         | x      |              |            |                    | x                              | x         |               |

Tabel 1. Π-kenmerken in strategische bronnen

In tabel 2 kan worden afgelezen dat er bepaalde kenmerken vaker worden besproken in de literatuur dan andere. Het meest besproken kenmerk is de interconnectivity/open web, gevolgd door de dynamische aard van het PI, samenwerking tussen PI bedrijven (collaboration) en de infrastructuur in het algemeen ( $\Pi$ -hub,  $\Pi$ -voertuig,  $\Pi$ -container).

Het kenmerk interconnectivity/open web is een overkoepeling van twee kenmerken besproken door (Montreuil, 2011). Deze kenmerken worden samengenomen aangezien ze vaak samen besproken worden en ook overlappen met elkaar in de verzamelde literatuur. Dit zien we bijvoorbeeld terug in (Kulkarni et al., 2022), waar het ontwerpen van een resiliënt hyperconnected logistics hub netwerk wordt onderzocht. Er wordt een gevalstudie ontwikkeld waarin de auteurs de ontwikkelde oplossingsbenaderingen toepassen om een veerkrachtig, sterk verbonden netwerk van logistieke hubs voor pakketbezorging tussen steden te ontwerpen. Dit netwerk zal dienen als de belangrijkste infrastructuur voor transport en het bundelen van pakketten in China. Meerdere pakketbezorgingsbedrijven kunnen gebruik maken van dit netwerk om dagelijks miljoenen pakketten te verplaatsen tussen Chinese steden. Om een goed verbonden netwerk te ontwerpen, hebben de auteurs gekeken naar 807 mogelijke locaties voor intercity hubs. Deze locaties zijn belangrijke kruispunten op snelwegen en/of bestaande hubs in steden. Door gebruik te maken van deze locaties kan het verkeer binnen steden worden vermeden en onnodige vertragingen worden voorkomen. Daarnaast geldt er een regel van de Chinese overheid dat een vrachtwagenchauffeur maximaal 11 uur per dag mag rijden. Daarom werd de maximale rijtijd tussen locaties beperkt tot een bepaald aantal uur, zodat vrachtwagenchauffeurs dagelijks naar huis kunnen terugkeren terwijl de pakketten blijven bewegen naar hun bestemmingen. Het resulterende netwerk heeft 44.330 gerichte verbindingen. Dit is anders dan traditionele logistieke hubnetwerken, waarbij alleen bepaalde vervoersverbindingen in het netwerk worden gebruikt en vrachtwagenchauffeurs lange afstanden moeten afleggen. Dit netwerk wordt vergeleken met traditionele netwerken en er wordt vervolgens nagegaan of het netwerk resiliënt is door meerdere verstoringsscenario's toe te passen op het model. Ze doen dit simpelweg door een verschillend aantal oorsprong-bestemmingsparen uit te schakelen, en dit ofwel willekeurig of gebaseerd op specifieke locaties. De resultaten tonen aan dat het netwerk beter omgaat met verstoringen, en dat de algemene prestaties van dit netwerk hoger lagen dan de traditionele netwerken. Uiteindelijk tonen de resultaten aan dat de ontworpen netwerken resiliënt kunnen zijn zonder significante prestatievermindering. Hierdoor benadrukt dit onderzoek de waarde van het PI bij het ontwerpen van efficiënte en robuuste, sterk verbonden logistieke netwerken. Deze zogenaamde resilience is een ander  $\Pi$ -kenmerk dat wordt genoemd door (Montreuil, 2011). Deze resilience in netwerken wordt naast (Kulkarni et al., 2022) enkel nog besproken door (Dong & Franklin, 2021). Hun netwerkmodel wordt opgesteld doormiddel van een simpel grafentheoretisch model. Een graaf bestaat uit een aantal punten (knopen genoemd) die verbonden zijn door lijnen (ook wel zijden genoemd). Interconnectiviteit wordt bijvoorbeeld gemodelleerd als zijden die alle knopen in de graaf verbinden. Ook houdt het model rekening met het behandelen van  $\Pi$ -containers in tegenstelling tot het behandelen van de goederen zelf. Dit wordt gerealiseerd door inpak-stations te modelleren als knopen in het netwerkmodel, waar alle goederen die het systeem binnengaan worden verpakt in gestandaardiseerde  $\Pi$ -containers, waarna ze verder door het netwerk kunnen gaan. Het concept van een open globaal supply web wordt ondersteund

aangezien volgens de auteurs hun netwerkmodel representatief kan zijn voor eender welk soort globaal web. Daarnaast kan de structuur van het model (welke verbindingen er worden gevormd, welke hubs prioriteit krijgen etc.) in real-time worden aangepast worden, wat gebaseerd is op de dynamische aard van het PI. Tot slot kan de veerkrachtigheid en de betrouwbaarheid van het netwerk worden weergegeven door het aantal veranderingen dat wordt toegestaan in het netwerk. Ook in (Sternberg & Denizel, 2021) wordt er een belangrijke assumptie gemaakt op basis van interconnectiviteit en open supply webs. In dit onderzoek wordt opgemerkt dat, hoewel de  $\Pi$ -containers een essentieel onderdeel zijn van het  $\Pi$ -systeem, er in eerdere onderzoeken weinig aandacht is besteed aan de herpositionering van deze containers. Dit terwijl dit juist een belangrijk aspect is dat van invloed is op de efficiëntie van het  $\Pi$ -netwerk. Sternberg & Denizel, (2021) onderzoeken hoe het ontwerp en de kenmerken van  $\Pi$ -containers bepalend zijn voor de manier waarop containers door een netwerk stromen. Gebaseerd op interconnectivity en open supply web maken de auteurs in hun model de assumptie dat de  $\Pi$ -containers automatisch worden gerouteerd via verschillende routes van hun oorsprong tot hun bestemming. Het doel is dan ook om  $\Pi$ -containers te routeren tussen hubs, waarbij het terugbrengen van lege containers wordt geminimaliseerd. Er wordt gekeken naar de mogelijke effecten van verschillende inputs, die worden bepaald door hoe goed de  $\Pi$ -containers bij elkaar passen. Resultaten tonen aan dat er in het beste geval de herpositionering van lege containers 7,6% is, wat beter is dan in het huidige logistieke systeem.

In (Krogsgaard et al., 2018) wordt de interconnectiviteit weergegeven in een liner shipping netwerk. Volgens de auteurs is in de literatuur een twee fase aanpak het meest succesvol om dit soort netwerken te ontwerpen. Er worden namelijk eerst routes ontwikkeld voor de schepen, waarna er een optimalisatieprobleem wordt opgelost om te berekenen hoe de containers optimaal de routes kunnen gebruiken om aan alle vraag te voldoen. In dit artikel wordt een andere aanpak gekozen door eerst de containers door een flexibel netwerk te laten stromen en vervolgens rotaties te ontwerpen die hierbij passen. Om de belangrijke hubstructuur in een containervervoersnetwerk vast te leggen, worden de rotaties gegenereerd op basis van een initiële stroom, waarbij de vracht door een volledig netwerk met alle mogelijke verbindingen tussen havens wordt geleid (flexibel netwerk). Deze verbindingen hebben variabele prijzen, waarbij ze duurder zijn bij lage belading en goedkoper bij hoge belading, om de vracht te concentreren op minder verbindingen. Deze initiële stroom kan ook worden gezien als het vervangen van punt-tot-punt vervoer door intermodaal transport, wat ook in de omschrijving van Montreuil, (2011) terug te vinden is.

(Bae et al., 2022) leggen uit dat een PI logistiek systeem de mogelijkheid heeft om efficiënt en milieuvriendelijk logistieke middelen zoals containers, vrachtwagens en overslagpunten toe te wijzen voor vrachttransportplanning. Dit gebeurt volgens hen via gedeelde, open en samenwerkende netwerken. Ook hier komt het open netwerk en de interconnectiviteit aan bod, maar de nadruk ligt hier vooral op de samenwerking (collaboration) tussen de spelers in het PI. Het delen van capaciteit is een belangrijk concept en drijvende kracht achter het voorgestelde  $\Pi$ -model, waarbij het verhogen van de benutting van middelen en het efficiënt consolideren van ladingen centraal staan in de simulatiestudie. Er wordt gekeken naar drie doelstellingen in het systeem: gemiddelde afstand per vrachtwagen per container, gemiddelde doorlooptijd per container en gemiddelde beladingsgraad

van vrachtwagens. Enkele voordelen van het  $\Pi$ -systeem zijn onder andere kleinere rijafstanden voor vrachtwagens, waardoor ladingen sneller van de oorsprong naar de bestemming worden vervoerd. Dit heeft ook een positieve impact op het milieu, omdat een afname in rijafstand leidt tot minder CO<sub>2</sub>-uitstoot. Desondanks is opgemerkt dat het aantal containeruitwisselingen op overslagpunten toeneemt onder het  $\Pi$ -systeem, vanwege vaker laden en lossen. Het succes van het PI systeem hangt ook sterk af van de winstmarges van de transportbedrijven, omdat dit hun deelname aan het delen van middelen beïnvloedt. In het algemeen werd geconcludeerd dat de gemiddelde beladingsgraad van vrachtwagens gemiddeld 15% hoger is wanneer er samenwerking is door een PI netwerk. Deze samenwerking in PI netwerken wordt ook gemodelleerd door Ghaderi et al. (2022) die het concept van collaborative crowdshipping voorstellen wat betekent dat LMD (last mile delivery) kan worden uitgevoerd met meer dan één crowdshipper, waarbij gebruik wordt gemaakt van pakketkluisjes als uitwisselingspunten. Dit is gebaseerd op het idee van het PI waarbij meerdere voertuigen worden gebruikt om een pakket naar de eindbestemming te brengen, met  $\Pi$ -hubs als tussenstops. Er wordt geconcludeerd het gebruik van deze pakketkluisjes in een crowdshipping netwerk zorgt voor een kortere afstand tussen de afleverpunten en een betere geografische dekking. Dit betekent dat er minder tijd en afstand nodig is om de pakketjes af te leveren, wat efficiënter is. Uit numerieke analyses op grote datasets bleek dat het toestaan van gezamenlijke levering de succesvolle bezorgingsgraad tot 5% kan verbeteren. Dit kan worden bereikt door een klein aantal pakketkluisjes in te zetten op 'kritieke' locaties. Dit betekent dat meer pakketjes op tijd kunnen worden bezorgd.

(Ambra et al., 2021) leggen de nadruk op het transparant maken van logistieke netwerken zodat ze toegankelijk zijn voor verschillende gebruikers zoals verladers en vervoerders. Gebruikers kunnen verbinding maken met het  $\Pi$ -netwerk en bestellingen plaatsen, die vervolgens worden toegewezen aan de dichtstbijzijnde beschikbare transportdienst en naar de afzender worden gebracht. Het gebruik van andere bestaande netwerken vereist een zekere mate van transparantie, zodat een dergelijk netwerk in eerste instantie kan worden geïdentificeerd. In dit opzicht maakt het Internet of Things (IoT) verbinding met objecten via het internet en mobiele netwerken. In de paper wordt dit soort netwerk benaderd via verschillende geo-platformen die GPS-apparaten en sensorinformatie integreren in een server die vervolgens de ruimtelijke en temporele kenmerken (locatie, afstand, snelheid etc.) van objecten (voertuigen, pakketten, distributiecentra) verwerkt en andere objecten in de omgeving detecteert. Op deze manier kan de transparantie van het netwerk worden gesimuleerd, aangezien ervan wordt uitgegaan dat voertuigen in het netwerk voorzien zijn van sensoren en de mogelijkheid hebben om informatie te delen met hun omgeving via IoT en gps-toepassingen. De auteurs halen ook aan dat de  $\Pi$ -hubs in hun simulatie de planning in real-time kunnen aanpassen nadat de data van de voertuigen wordt ontvangen, wat de dynamische aard van het PI weergeeft. Er wordt geconcludeerd dat transparantie in het netwerk een significant positief effect heeft op lead times van vrachtwagens. Deze dynamische aard van het PI wordt op een andere manier weergegeven door Qiao et al., waar het PI wordt gemodelleerd door verschillende verbonden  $\Pi$ -hubs (transportknooppunten) voor de doorstroming van vracht. In elke hub kunnen verzenders transportverzoeken indienen, waarop vervoerders transportdiensten kunnen aanbieden. De auteurs gaan ervan uit dat er een grote hoeveelheid verzoeken zijn in de hub en dat deze via een

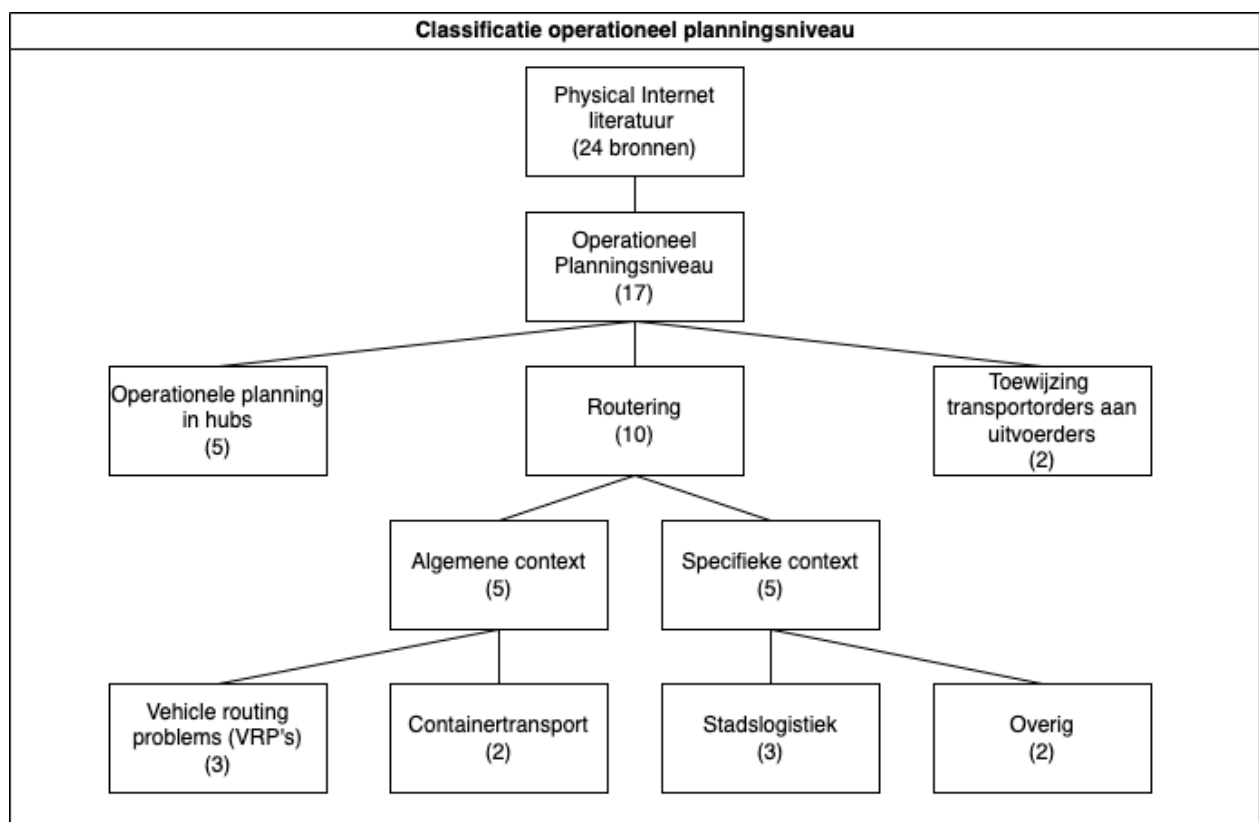
veilingmechanisme aan vervoerders worden toegewezen. Dit betekent dat vervoerders moeten deelnemen aan opeenvolgende veilingen om de verzoeken te winnen, rekening houdend met hun capaciteitsbeperkingen (beperkte capaciteit) en vertrektijd (beperkte tijd). In een  $\Pi$ -hub zijn er veel verschillende soorten verzoeken met verschillende aantallen. De transportkosten en de verwachte winst voor de vervoerder kunnen sterk verschillen tussen de verschillende verzoektypen. In deze context wordt er aangenomen dat de vervoerder een dynamische prijsstrategie hanteert om de winst te maximaliseren. Dit wil zeggen dat er bij het selecteren van een transportverzoek, rekening wordt gehouden met mogelijke toekomstige verzoeken, die via forecasts kunnen voorspeld worden. Het gaat hier dus over hoe de verladers het transportverzoek moet selecteren om op te bieden, en hoe de biedprijs moet bepaald worden om winst te maximaliseren. Deze paper draagt dus bij aan de ontwikkeling van een winstmaximalisatie model voor LTL-verladers in het PI.

Hieruit kan worden geconcludeerd dat de bronnen die vallen onder het strategische planningsniveau vooral rekening houden met interconnectiviteit en het gebruik van een globaal open supply web, aangezien deze kenmerken worden toegepast in acht van de negen bronnen. Dit wordt in de literatuur vooral gerealiseerd door de netwerken zodanig te ontwerpen dat alle knooppunten (hubs) met elkaar verbonden zijn en dus alle routes beschikbaar zijn voor het transport van (PI)-containers, en door deze verschillende routes beschikbaar te maken voor alle spelers in het model. Dit sluit aan bij het concept van Montrueil, die het globaal open supply web beschrijft als een wereldwijd open web van productiecentra, distributiecentra, magazijnen, hubs en transitcentra, waar producenten, distributeurs en retailers hun producten met n-containers dynamisch kunnen inzetten op meerdere geografisch verspreide centra. De infrastructuur wordt vermeld in zes van de negen bronnen. Het gaat hier dan vooral over  $\Pi$ -hubs die als knooppunten dienen voor de netwerken. Vervolgens wordt de dynamische aard en de samenwerking tussen bedrijven in drie van de negen bronnen vermeld. De dynamische aard van het PI is natuurlijk een algemene omschrijving die verschillende aspecten omvat en wordt in de literatuur dus ook op verschillende manieren opgenomen in de modellen. In elk geval gaat het over het gebruik maken van real-time data bij onderanderen de planning in de  $\Pi$ -hubs, het aanpassen van routes in het netwerk, en het bepalen van de prijsstrategie. Over het algemeen wordt besloten in de literatuur dat het opnemen van deze kenmerken in de netwerkmodellen positieve effecten heeft tegenover traditionele modellen, waardoor het belang van het PI wordt aangetoond.

### **3. Operationeel planningsniveau**

In deze sectie wordt de literatuur besproken die kan worden geclassificeerd onder het operationeel planningsniveau. Zoals eerder werd uitgelegd in sectie 1.2 wordt bij het operationele niveau het strategisch plan uitgewerkt tot een gedetailleerde routekaart die precies aangeeft welke acties er wekelijks tot dagelijks genomen worden. Om de verzamelde literatuur te structureren worden er verschillende subcategorieën gemaakt. Deze structuur wordt volledig weergegeven in onderstaande figuur (figuur 3), en zal hier verder worden uitgelegd. Van de 25 bronnen die in totaal verzameld zijn, zijn er 17 bronnen die een operationeel planningsniveau bespreken. Deze 17 bronnen worden

verder opgedeeld in drie subcategorieën, gebaseerd op welk soort probleem er besproken wordt. De eerste en grootste subcategorie, die bestaat uit 10 bronnen, is 'routing'. Dit is logisch, aangezien routeringsproblemen in de logistieke sector gezien worden als één van de belangrijkste problemen op operationeel niveau. De tweede en derde subcategorieën zijn 'operationele werking in hubs' en 'toewijzing transportorders aan uitvoerders', die respectievelijk vijf en twee bronnen bevatten. Tot slot wordt de grootste subcategorie 'routing' verder opgedeeld in routeringsproblemen met een algemene context en routeringsproblemen met een specifieke context. Beide subcategorieën bevatten vijf bronnen. Van de routeringsproblemen met algemene context gaan drie bronnen over vehicle routing problemen (VRP's) en twee bronnen over containertransport. Van de routeringsproblemen met specifieke context zijn er twee bronnen waarvan de context stadslogistiek is, en twee die elke een andere specifieke context hebben. In de volgende secties (sectie 3.1 t.e.m. 3.3) zal de verzamelde literatuur per subcategorie worden besproken. In de beschrijving van de bronnen wordt eerst en vooral de context van de paper en het besproken probleem kort samengevat. Er wordt vervolgens aangehaald welke beslissingen er moeten worden genomen en wie de beslissingsnemer(s) is (zijn). Ook wordt vermeld welke kenmerken van het PI er worden toegepast in de modellen.



*Figuur 8. Classificatie van de literatuur in het operationele planningsniveau*

### 3.1 Routering

De eerste categorie die ingevuld wordt is 'routering'. Alle papers die een probleem bespreken dat te maken heeft met het routeren van voertuigen door een bepaald netwerk in de brede zin vallen onder deze categorie. In de literatuur worden dit soort problemen vaak 'vehicle routing problems' (VRP) genoemd. Het VRP is een gekend optimalisatieprobleem binnen de logistieke sector dat eind jaren vijftig werd voorgesteld en het is nog steeds een van de meest bestudeerde problemen op het gebied van operationeel onderzoek. Het doel van het klassieke VRP is om goederen aan een aantal klanten met gekende vraag te leveren doormiddel van routes die vertrekken en eindigen op hetzelfde depot en met minimale kosten. Het VRP werd in 1959 geïntroduceerd door Dantzig en Ramser (Dantzig en Ramser, 1959). Moderne transportsystemen zijn echter niet alleen grootschalig maar ook zeer dynamisch, waardoor het lastig is om alleen met klassieke methodes te optimaliseren. Zoals verder duidelijk zal worden zijn de meeste VRP's die besproken worden varianten van het klassieke model. Daar komt ook nog bij dat de besproken modellen aangepast zijn om te kunnen werken binnen het PI.

### 3.1.1 Algemene context

Van de vijf papers met algemene context zijn er twee die gaan over container transport door een netwerk, twee algemene VRP's , en 1 paper die dynamisch routing protocol ontwerpt op basis van een prijsmechanisme.

Als eerste analyseren (Arnau et al., 2022) een realistisch en nieuw probleem binnen het PI, dat bestaat uit containertransport via een 'spoke-hub'-netwerk. Containers moeten op of voor een bepaalde deadline van hun herkomstlocaties naar hun eindbestemming worden vervoerd en kunnen tijdelijk worden opgeslagen in netwerkhubbs. Elke vrachtwagen kan één container per keer van de ene hub naar de andere verplaatsen, containers kunnen door verschillende vrachtwagens worden vervoerd op hun weg van oorsprong naar bestemming, en chauffeurs moeten op tijd terug zijn op hun startpunt. In een dergelijk scenario, en met als belangrijkste doel de totale tijd minimaliseren die nodig is om alle containers van hun oorsprong naar hun bestemming te verplaatsen (rekening houdend met sociale en milieuaspecten), moeten verschillende beslissingen worden genomen: (i) welke container moet als volgende worden vervoerd?; (ii) welk pad moet de geselecteerde container volgen?; (iii) welke chauffeur is verantwoordelijk voor het verplaatsen naar de volgende hub in het netwerk?; en (iv) hoe om te gaan met de synchronisatieproblemen die zich kunnen voordoen in dit soort dynamische transportsystemen? Deze beslissingen worden genomen door de verschillende logistieke spelers in het netwerk. Om dit dynamisch probleem op te lossen wordt eerst een snelle en eenvoudige heuristiek voorgesteld, die gebaseerd is op discrete event simulatie. Deze heuristiek bepaalt de eerstvolgende container die vervoerd moet worden, berekent het kortste pad en identificeert de dichtsbijzijnde chauffeur om de container te vervoeren. Deze heuristiek wordt dan uitgebreid naar een algoritme dat meerdere oplossingen berekent. Daarna worden alle mogelijke oplossingen geanalyseerd en de optimale oplossing wordt geselecteerd.

(Li et al., 2022) bespreken ook een container transportprobleem door een netwerk, maar er zijn enkele verschillen met de paper van (Arnau et al., 2022). Zo gaat het hier bijvoorbeeld niet over een spoke-hub netwerk. Wel wordt hier rekening gehouden met een ander belangrijk aspect, herpositionering van lege containers/vrachtwagens. Dit houdt in dat de ritten van de lege vrachtwagens gebruikt kunnen worden voor extra transportaanvragen. De beslissingsnemer is hier een transportbedrijf dat verantwoordelijk is voor containertransport tussen een terminal en een aantal logistieke knooppunten. Vanwege de onevenwichtigheid van inkomende en uitgaande verzoeken op verschillende hubs, komt herpositionering van lege containers en vrachtwagens vaak voor. Om de winstgevendheid te vergroten, accepteert het transportbedrijf ook verzendingsverzoeken tussen de hubs door. Deze verzoeken zijn echter zeer willekeurig, en de kans is groot dat er niet genoeg van deze aanvragen dezelfde route volgen als een lege container die van de ene hub naar de andere te moet worden vervoerd. De mismatch tussen vraag en aanbod werpt een barrière op voor het verhogen van de winst van het transportbedrijf. De auteurs merken op dat dit probleem kan bekeken worden als een klassiek SVRP (selective vehicle routing problem). Echter, in het klassiek SVRP kiest de vervoerder welke klanten bediend worden om winst te maximaliseren. Deze gekozen klanten worden dan bediend met één voertuig in één route. Voor het probleem van

deze paper wil dat zeggen dat de extra verzendverzoeken die worden aangenomen, exact dezelfde begin en eindbestemming zouden moeten hebben als de herpositionering van de lege trucks/containers. Om deze reden wordt het klassieke SVRP aangepast naar een  $\Pi$ -SVRP zodat de extra verzendverzoeken worden uitgevoerd door meerdere vrachtwagens na elkaar en de lading dus wordt overgedragen van de ene naar de andere vrachtwagen in de tussenliggende hubs voordat de eindbestemming wordt bereikt. De belangrijke beslissingen die moeten genomen worden voor het transportbedrijf zijn dus: (1) Hoe moet er beslist worden om een verzoek wel of niet te accepteren? En (2) Hoe moeten de extra transportaanvragen gepland worden tussen de herpositioneringen van de lege vrachtwagens? Om deze beslissingen te ondersteunen wordt het  $\Pi$ -SVRP gemodelleerd als een mixed integer programmeer probleem. Dit model kan worden opgelost met CPLEX voor kleine voorbeelden. Voor grotere, realistische problemen wordt er een heuristiek ontwikkeld.

De volgende twee artikels bespreken beiden worden er twee artikels besproken die beiden gaan over een  $\Pi$ -VRP waarbij de context algemeen blijft.

(Ancele et al., 2021) hebben als doel om het klassieke VRP (vehicle routing problem) uit te breiden en aan te passen aan het PI. Het VRP met cross-dock is een al bestaande variant van de klassieke VRP. Deze cross-dock faciliteiten maken het mogelijk om producten over te dragen en te verwerken. Een cross-dock kan worden beschouwd als een consolidatiefaciliteit met tijdelijke opslag. Het principe van zo'n systeem is om binnenkomende containers uit te laden en te sorteren, en vervolgens de uitgaande containers op voertuigen te laden. Deze aanpak verschilt van de rechtstreekse verzending van producten waarbij niet naar tussenliggende overslagpunten wordt gevraagd. Deze bestaande variant van het VRP is belangrijk om te vermelden aangezien er in het PI ook aangepaste crossdocks gebruikt worden die dan  $\Pi$ -hubs worden genoemd. Er wordt een VRP-model ontwikkeld met als doel het plannen van routes voor een reeks voertuigen om aan de vraag van de klanten te voldoen. Om het model beter te laten aansluiten met het PI, worden verschillende attributen toegevoegd zoals de beschikbaarheid van meerdere crossdocks/hubs, verschillende start/eind depots waardoor voertuigen op het einde van de route niet terug naar het vertrekpunt moeten gaan, en gelijktijdig ophalen en bezorgen op dezelfde route. Ook wordt er rekening gehouden met externe transportmiddelen, waarbij voertuigen van andere bedrijven tijdelijk beschikbaar kunnen zijn. De beslissingsnemer is dus een logistieke organisatie die werkt met meerdere cross-docks om te voldoen aan transport aanvragen van de klanten. De beslissingen die moeten genomen worden bestaan dus voornamelijk uit het berekenen van de optimale routes en welke transport aanvragen geaccepteerd worden en in welke volgorde ze het best kunnen uitgevoerd worden. De beslissing die gaat over welke transportaanvragen moeten geaccepteerd worden wordt ook al besproken in de paper van Li et al., (2022), al gaat het daar meer over het al dan niet accepteren van de extra transportaanvragen die kunnen gedaan worden wanneer de lege trucks terugrijden. Het model wordt wiskundig geformuleerd als een mixed integer lineair programmeerprobleem. Optimale oplossingen worden berekend met CPLEX voor kleine instanties. Aangezien dit voor grote instanties veel tijd zou kosten, wordt ook een heuristiek ontwikkeld die gebaseerd is op Simulated Annealing (SA).

(Shi et al., 2020) bespreken een andere belangrijke variatie van het VRP, namelijk het dynamische VRP. Bij het dynamisch VRP kunnen er nieuwe transportverzoeken aangenomen worden tijdens de uitvoering van de voorheen geplande werkdag. Dit doet denken aan de paper van Li et al., (2022), waar de lege vrachtwagens onderweg nog extra transportverzoeken kunnen aannemen.

Het gaat hier om een probleem binnen het O2O (online-to-offline) logistiek systeem binnen het physical internet. (Door het stijgende belang van e-commerce wordt ook de ontwikkeling van O2O versneld). Online-to-offline is een model waarbij potentiële klanten via onlinekanalen worden aangetrokken om aankopen te doen in fysieke winkels. Over het algemeen zijn O2O-bezorgers gedurende de dag onderhevig aan onevenwichtigheden in de leveringscapaciteit op verschillende uren, met name tijdens piekuren en daluren. Om het probleem van onvoldoende capaciteit tijdens piekuren en het probleem van onbenutte capaciteit in daluren van O2O-bezorgers op te lossen, introduceert deze paper een innovatief B2C (business to consumer)- en O2O-gezamenlijk distributiesysteem met digitale connectiviteit. In dit systeem zijn alle ophaal- en afleverknooppunten van zowel B2C- als O2O-bestellingen met elkaar verbonden via het PI. Via digitale connectiviteit, een kernmerk van het PI, kan logistieke data live gedeeld worden doorheen het netwerk, en kunnen er meteen aanpassingen worden gemaakt in de planning. Ook dit probleem is in principe een uitbreiding van het VRP (vehicle routing problem). Meer specifiek behoort dit probleem onder de dynamische VRP's. Het netwerk in de paper bevat één bezorgcentrum, zowel B2C- als O2O-bezorgers moeten vanuit dit centrum vertrekken. De B2C-bezorgers halen B2C-bestellingen op in het centrum, maar de O2O-bezorgers beginnen gewoon vanuit het centrum en halen onderweg O2O-bestellingen op bij de gedecentraliseerde offline winkels. In de gezamenlijke distributiemodus kan een bezorger zowel B2C-bestellingen in het centrum ophalen als O2O-bestellingen in offline winkels. Om deze reden wordt het B2C-ophaal- en bezorgprobleem samen gemodelleerd in het O2O-probleem. Het model wordt wiskundig uitgeschreven en er wordt gebruik gemaakt van een besparingsalgoritme om de real-time routeringsoptimalisatie te realiseren, elke aankomst van een nieuwe O2O-bestelling wordt beschouwd als een nieuwe planningsfase. Het besparingsalgoritme kan alle leveringseisen efficiënt vervullen binnen een logistiek netwerk met een minimaal aantal voertuigen, de minste kilometers en de laagste kosten. Aangezien het model veel complexe beperkingen met zich meebrengt, wordt een heuristiek ontwikkeld met het besparingsalgoritme om het dynamische VRP op te lossen, waardoor de real-time logistieke levering met hoge efficiëntie wordt bereikt.

Het onderzoek van (Briand et al., 2022) verschilt van de rest aangezien er geen puur VRP wordt gemodelleerd. In de plaats wordt er een routering protocol ontwikkeld dat gebaseerd is op veilingen met onderliggende prijsmechanismen. Dit onderwerp werd al besproken als één van de categorieën bij de strategische/tactische planningsniveaus. De hoofdcategorieën (strategisch/tactisch vs. operationeel) gaan echter over welk soort beslissingen er ondersteund worden, niet de methoden die worden gebruikt. Het gaat hier om veilingen met prijsmechanismen die gebruikt worden om operationele beslissingen te ondersteunen, zoals verder wordt uitgelegd. Dit is de reden dat Briand et al., (2022) onder het operationele niveau worden geclassificeerd.

Het PI moet een groot aantal ladingen per dag dynamisch over de hele wereld transporteren. Dit vereist dus een radicaal nieuw ontwerp van de protocollen en processen om vrachtvervoer te beheren en het klassieke Freight Transportation Service Procurement (FTSP) -probleem op te lossen. Dit probleem bestaat uit het afstemmen van de transportbehoeften van verladers en de capaciteiten van vervoerders. Dit probleem kan vanuit verschillende standpunten worden bekeken. Vanuit het standpunt van de verlader (vervoerder) is het probleem de selectie (levering) van diensten en de keuze van de juiste methoden om deze te kopen (verkopen). Vanuit marktoogpunt is het doel het bepalen van methoden, protocollen en regels die verladers (vervoerders) ertoe aanzetten diensten efficiënt en effectief te kopen (verkopen). Elke keer dat een lading aankomt op een knooppunt dat niet de finale bestemming is, moeten een volgend knooppunt, een vervoerder en een prijs gezamenlijk worden geselecteerd om de lading dichterbij zijn bestemming te brengen. Dit zijn drie beslissingen die genomen moeten worden. De dynamische aard van het routingssysteem en het grote aantal ladingen dat in korte tijd moet worden verwerkt, zijn moeilijk op te lossen in standaard processen. Het doel van deze paper is een eenvoudig te gebruiken protocol ontwerpen. Dit doen ze met behulp van een spel theoretische benadering waarvan de kerncomponent een veilingproces is dat wordt uitgevoerd telkens wanneer een lading aankomt op een nieuw knooppunt dat verschilt van zijn bestemming. Het protocol heeft als doel de prijs van het totale routingsproces te minimaliseren. Het uiteindelijke protocol omvat drie spelers, namelijk de verladers, knooppunten en vervoerders. Om zo een nieuw systeem te modelleren wordt er gebruikt gemaakt van een simulatie. Er wordt een omgeving gesimuleerd met alleen Full-Truck-Loads (FTL's) in een markt die bestaat uit enkelvoudige vrachtwagenbedrijven. Deze bedrijven zijn dus, samen met de verladers, de beslissing nemers. De vervoerders moeten beslissen welke prijs ze bieden voor een onderdeel van de totale route, de verladers moeten beslissen welk aanbod ze uiteindelijk kopen. De auteurs gaan uit van eenvoudig gedrag voor verladers en er wordt gebruik gemaakt van een leerproces voor knooppunten en vervoerders. De conclusie is dat het gebruik van een dergelijk protocol uiterst efficiënt is, omdat het de totale bezorgkosten en lege kilometers (transport zonder vracht) aanzienlijk verlaagt tegenover een situatie waar de prijzen, knooppunten en vervoerders manueel bepaald worden door de betrokken transportbedrijven.

### 3.1.2 Specifieke context

Vijf artikels van de verzamelde literatuur onder de 'routing' categorie bestuderen een routeringsprobleem in een specifieke context. Voor drie van de vijf papers is dit een stedelijke context. Op dat vlak verschillen ze duidelijk van de rest van de papers, en worden ze dus in een aparte categorie geclassificeerd. Dit wil echter niet noodzakelijk zeggen dat de ontwikkelde modellen totaal niet van toepassing kunnen zijn in andere situaties, zoals verder duidelijk zal worden.

De eerste twee papers die besproken worden zijn beiden geschreven door dezelfde auteurs. Het gaat hier om (Luo et al., 2021) en (Luo et al., 2022) respectievelijk.

(Luo et al., 2021) ontwikkelen een  $\Pi$ -gebaseerd model voor het leveren van meubelen op maat in een stedelijke context. De beslissingsnemer is hier dus een meubelbedrijf dat zelf leveringen uitvoert of een 3PL (third party logistics provider). Hoewel dit een zeer specifiek probleem lijkt te zijn, halen de auteurs aan dat het model kan helpen voor transport van andere volumeuze goederen in steden. Het basismodel dat in deze studie wordt gepresenteerd, is het VRP (vehicle routing problem) met gelijktijdig ophalen en bezorgen van goederen. Dit is opnieuw een belangrijke variant van het klassieke VRP, naast het VRP met crossdocks dat uitgebreid werd door Ancelet et al. 2019. Het vereist gelijktijdig ophalen van goederen van hun locatie en de levering van goederen aan hun bestemming. Beslissingen die moeten gemaakt worden gaan over hoe de goederen het best kunnen getransporteerd worden om aan alle vraag te voldoen en de kosten te minimaliseren. Er zijn drie aanpassingen die gemaakt worden om het VRP op het PI af te stellen in deze context, namelijk  $\Pi$ -containers,  $\Pi$ -voertuigen en een  $\Pi$ -beslissingsplatform. Eerst en vooral wordt de  $\Pi$ -container (met smart-locker) geïntroduceerd om snelle laadtijden (inladen/uitladen) te garanderen door de gestandaardiseerde afmetingen. Ten tweede moet het  $\Pi$ -voertuig zorgen voor het autonoom laden/lossen van containers voor de klant, zonder gebruik van heftrucks. Als laatste wordt het  $\Pi$ -beslissingsplatform gebruikt voor verschillende digitale oplossingen zoals mobiele applicaties en dashboards voor managers die kunnen helpen bij het maken van de operationele beslissingen. Het model wordt wiskundig geformuleerd en opgelost met een nieuw ontwikkeld algoritme. Een hybride genetische algoritme en een variabel neighbourhood search werden geïntegreerd als onderdeel van dit nieuwe algoritme, dat is gebaseerd op een iteratieve procedure, waardoor consistente en optimale resultaten worden gegarandeerd.

In (Luo et al., 2022) wordt er opnieuw een specifiek probleem gemodelleerd in een stedelijke context. Het doel van deze paper is echter om een operationeel model binnen de stadslogistiek te ontwerpen voor nieuwe detailhandel. Deze bron werd al in detail omschreven in sectie 2 en zal dus niet worden herhaald. De operationele beslissing in deze paper gaat over het bepalen van de optimale route voor voertuigen waarbij ook rekening wordt gehouden met het ophalen van lege containers.

De beslissingen die genomen worden zijn dus; (1) Het definiëren van het aantal en de locaties van de  $\Pi$ -hubs. (2) Het toewijzen van klanten aan elk van de  $\Pi$ -hubs. (3) de routing van de voertuigen waarbij rekening gehouden wordt met het ophalen van lege containers. De eerste twee beslissingen zijn strategische/tactische beslissingen. De derde is een operationele beslissing en valt dus onder de categorie VRP. Er wordt een wiskundig model van de voorgestelde oplossing opgesteld. Een algoritme is ontworpen op basis van een iteratieve procedure, die zorgt voor consistente en optimale resultaten.

(Ben Mohamed et al., 2017) bespreken een probleem in de context van "interconnected city logistics" (ICL) dat binnen het PI concept valt. Het is dus opnieuw een stedelijke context. ICL is gebaseerd op het concept van verbondenheid, dat als doel heeft te verschuiven naar een open systeem waarin een groot aantal verschillende spelers betrokken zijn en waar het wederzijds gebruik van bestaande stedelijke logistieke voorzieningen benadrukt wordt. Deze verschuiving naar ICL brengt belangrijke beslissingen mee over de implementatie en het vervoer van  $\Pi$ -containers binnen steden met als doel de bezorgkosten en de ecologische voetafdruk te minimaliseren. Twee belangrijke beslissingen zijn de positionering van transportmiddelen per hub, en het inzetten van  $\Pi$ -containers in hubs. Om de routeringsbeslissingen te ondersteunen wordt het dagelijks  $\Pi$ -transportprobleem gemodelleerd en geoptimaliseerd. Er wordt voor elk transportverzoek (ophalen of bezorgen) rekening gehouden met het plannen van het transport van  $\Pi$ -containers over het stedelijke distributienetwerk. Dit wordt gedaan met als doel de aanbieders die een ICL-systeem gebruiken te laten zien hoe ze economische oplossingen van goede kwaliteit kunnen krijgen met acceptabele ecologische prestaties. Er zijn enkele belangrijke  $\Pi$ -aanpassingen gedaan. Er wordt uitgegaan van een "multi-period" setting. Dit wil zeggen dat het netwerk binnen een dag onderhevig is aan verschillende aanpassingen in de planning, door onder andere een variabele vraag. Met andere woorden, het probleem is dynamisch. Vervolgens wordt er een "multi-echelon" verdeling toegepast, wat wil zeggen dat er volledige transparantie is van gegevens in hubs in het hele netwerk. Hierdoor kunnen plannings op elkaar worden afgesteld, met als gevolg dat voertuigen tegelijk kunnen ophalen en bezorgen. Tot slot wordt het gebruik van  $\Pi$ -containers toegepast, met als doel dat het laden en lossen van goederen efficiënter verloopt. Het ICL-probleem wordt eerst en vooral wiskundig geformuleerd, met de nodige beperkingen. De auteurs beweren dat ze de eerste zijn die dit probleem wiskundig modelleren. Vervolgens wordt er een heuristiek ontwikkeld om tot oplossingen te komen waarbij meer aandacht wordt besteed aan zowel de economische als ecologische aspecten van het probleem. Economisch houdt dit natuurlijk in dat de kosten geminimaliseerd worden. Ecologisch gezien probeert men ook de totale uitstoot zo laag mogelijk te houden.

(Lin et al., 2022) passen het gekende meals-on-wheels (MOW) leveringssysteem aan naargelang de kenmerken van het PI. Meals on Wheels is een programma waarbij maaltijden bezorgd worden aan mensen thuis die niet in staat zijn om hun eigen maaltijden te kopen of te bereiden. De naam wordt vaak algemeen gebruikt om te verwijzen naar programma's voor thuisbezorgde maaltijden, die niet allemaal "Meals on Wheels" heten. Veel van de aan huis gebonden ontvangers zijn ouderen, en veel van de vrijwilligers zijn ook ouderen, maar zijn fysiek sterk en in staat om auto's te besturen. Meals-on-wheels bezorgdiensten zijn verschoven van self-delivery (SD), waarbij de levering tot aan huis

gedaan wordt door mensen binnen het programma (meal-on-wheels) zelf, naar outsourcing-delivery (OD) en volunteer-delivery (VD) modellen, waarbij de maaltijden naar een bepaald punt worden gebracht, en vervolgens door vrijwilligers of andere organisaties aan huis gebracht worden. Het OD-model wordt geïmplementeerd door voedselbezorgingsdiensten met winstoogmerk, en het VD-model wordt geïmplementeerd door tijdbanken zonder winstoogmerk die zijn ontworpen voor ouderen. Een tijdbank is een werksysteem dat gebaseerd is op wederkerigheid waarin gewerkte uren de valuta zijn. Met tijdbankieren kan een persoon met één bepaalde vaardigheid uren werk sparen en ruilen voor gelijke uren werk in een andere vaardigheid in plaats van te betalen of betaald te worden voor diensten. Om de modellen af te stemmen op het PI hebben de auteurs recycleerbare  $\Pi$ -containers, slimme lockers en een  $\Pi$ -beheersysteem geïntegreerd in SD-, VD- en OD-modellen om  $\Pi$ -modellen te ontwikkelen. Deze  $\Pi$ -containers zijn recycleerbaar en worden terug meegenomen na de levering. De smart-lockers worden gebruikt om de  $\Pi$ -containers tijdelijk in op te slaan. Om deze modellen op te lossen worden er integere lineaire programmeringsproblemen geformuleerd, die dan worden opgelost met behulp van een algoritme. Elk van de drie modellen worden geformuleerd als een routeringsprobleem. Het doel van dit routeringsprobleem is om optimale routes te vinden voor een vloot (fleet) van voertuigen en werkers om te voldoen aan een groep klanten met een gekende MOW-vraag, terwijl er gestreefd wordt naar een kwaliteitsvolle bediening door klanttevredenheid te maximaliseren en de kosten te minimaliseren. De beslissing komt dus neer op het vinden van de optimale route voor het bezorgen van eten naar klanten.

Tot slot bespreken (Puskás et al., 2020) ook een probleem in een specifieke context. Het doel van deze paper is het ontwikkelen van een model dat dient om  $\Pi$ -supply chains te optimaliseren waarin gebruikt gemaakt wordt van het concept 'platooning'. Platooning vertegenwoordigt een groep voertuigen op de weg waarin de afstand tussen de naburige voertuigen veel kleiner is dan menselijke bestuurders zelf zouden kunnen aanhouden zonder dat ze hierbij risico oplopen. De korte afstand wordt bereikt door voortdurende communicatie via vehicle-to-vehicle communicatie. Door de korte afstand tussen vrachtwagens, kan de totale wegefficiëntie verhoogd worden, als ook de aerodynamica van alle vrachtwagens, waardoor het brandstofverbruik wordt verminderd. In dit concept is er een platoon leider die vanvoor rijdt, gevolgd door de rest van de voertuigen. Op het moment dat alle voertuigen met elkaar worden verbonden (doormiddel van software) moet de bestuurder in het eerste voertuig gaan zitten waarna de rest van de voertuigen de snelheid en bewegingen automatisch volgen. Volgens de auteurs van de paper is de belangrijkste uitdaging de optimale werking van al de componenten in zo een systeem. Om deze reden wordt er een nieuw model geformuleerd dat rekening houdt met principes uit het PI, waaronder open hubs en communicatie tussen voertuigen. Het doel van het model is het optimaliseren van de verzendingen uitgevoerd door platoons tussen vooraf gedefinieerde hubs. Hiervoor is een virtuele hub nodig als ontmoetingspunt voor de platoons waar voertuigen kunnen gewisseld worden. De beslissingen die het model ondersteunt zijn (1) welke voertuigen worden samen in een platoon gebracht. (2) Hoe moeten de voertuigen in een platoon optimaal ingepland worden. Bij de tweede beslissing hoort natuurlijk ook de routing doorheen het netwerk van de platoons. De beslissingsnemers zijn verzenders die het concept platooning willen toepassen. Het model wordt wiskundig geformuleerd en er worden twee verschillende oplossingsmethoden toegepast. De eerste is een

algoritme/heuristiek. De tweede is gebaseerd op simulatie die gebruik maakt van reinforcement learning. In deze methoden worden agenten (de spelers in het systeem, in dit geval verzenders) opgeleid om zich optimaal te gedragen in een bepaalde omgeving. De tweede methode geeft betere oplossingen voor een groot aantal voertuigen. Voor kleinere aantallen bereikt de heuristiek betere oplossingen.

### 3.2 Operationele planning in hubs

Tot deze subcategorie behoren de papers die problemen bespreken die gaan over de operationele werking binnen de verschillende hubs in het  $\Pi$ -netwerk. Het woord 'hub' wordt in deze thesis in brede zin gebruikt. Hieronder vallen onder meer de  $\Pi$ -hubs die in de introductie al omschreven werden, als ook andere toepassingen zoals fullfilment-warehouses, veilingcentra, crossdocks etcetera. Van de verzamelde literatuur zijn er vijf papers die in deze subcategorie zijn geclassificeerd.

(Chargui et al., 2020) merken op dat de meeste studies de neiging hebben om zich alleen te concentreren op de optimalisatie van het wereldwijde supply chain-netwerk in plaats van het optimaliseren van lokale operaties met betrekking tot crossdocking of productie. De focus van hun paper is gericht op de optimalisatie van de operaties die plaatsvinden in de  $\Pi$ -knooppunten en meer bepaald de road-rail  $\Pi$ -hub. Het probleem dat in dit artikel wordt besproken, heeft betrekking op de planning van vrachtwagens en het groeperen van  $\Pi$ -containers. Het planningsprobleem bestaat uit het toewijzen van de vrachtwagens aan de dokken op een tijdshorizon, terwijl de toewijzing en groepering van  $\Pi$ -containers gebeurt door de  $\Pi$ -containers in de wagons te laden met inachtneming van de capaciteits- en bestemmingsbeperkingen van de wagons. Er wordt een multiagent-model voorgesteld om dit probleem op te lossen. Een MILP-formulering wordt voorgesteld om het probleem te modelleren en de prestaties te evalueren van het multi-agentsysteem in een statische context. Het multi-agentsysteem wordt ook geëvalueerd in een dynamische omgeving. De beslissingen die het model ondersteunt zijn: het toewijzen van containers aan wagons, het toewijzen van vrachtwagens aan docks, welke wagons gebruikt moeten worden, de bestemmingen van de vrachtwagens en de optimale route. Het bepalen van de optimale route is in principe een routeringsprobleem, maar is niet de focus van de paper. Om deze reden wordt de paper geclassificeerd bij 'operationele werking van de hubs' en niet bij 'routing'.

Ook (Walha et al., 2016) bespreken een gelijkaardig probleem. Hun onderzoek gaat over een toewijzingsprobleem in de context van het PI gericht op het verbeteren van de rail-road n-hub-efficiëntie door het optimaliseren van de afstand die elke container naar het dok aflegt, evenals het aantal gebruikte vrachtwagens. Het doel van de n-hub is het overzetten van n-containers van de inkomende treinwagons naar de uitgaande vrachtwagens. Ballot et al. ontwikkelde een nieuwe, specifieke "road-rail n-hub" voor het overzetten van containers van vrachtwagens naar treinen ("road  $\rightarrow$  rail"), en vice versa ("rail  $\rightarrow$  road"), alsook van de ene trein naar de andere ("spoor  $\rightarrow$  spoor"). Deze paper concentreert zich, zoals (Chargui et al., 2020) op het rail-road probleem, waarbij elke container aan zijn vrachtwagen wordt toegewezen (de capaciteit van de containers mag

niet groter zijn dan die van de vrachtwagen) en vervolgens de dokken worden toegewezen aan de juiste bestemming (alle containers in dezelfde vrachtwagen hebben dezelfde bestemming). Het belangrijkste doel is om de afstand die elke container aflegt om de dokken te bereiken, te minimaliseren, evenals het aantal gebruikte vrachtwagens. Om dit doel te bereiken wordt er een nieuwe heuristische methode ontwikkeld, die vervolgens verbeterd wordt door simulated annealing (SA). Het probleem is dus zeer gelijkaardig met het probleem dat besproken wordt door (Chargui et al., 2020), maar de methodes die gebruikt worden om tot oplossingen te komen verschillen sterk.

(Zhang et al., 2020) bespreken een opslagprobleem binnen magazijnen voor online orderafhandeling. Zulke magazijnen zijn een cruciaal onderdeel van het PI. In deze magazijnen worden online klantbestellingen omgezet in fysieke leveringspakketten met als operationeel doel snelle uitvoering. Structureel zijn ze anders dan traditionele magazijnen en de belangrijkste onderscheidende factoren zijn: een zeer groot aantal opslaglocaties voor bins (het magazijn bestaat uit kleine bins, in tegenstelling tot grote opslagplaatsen voor bulkopslag) een explosief opslagbeleid en gecombineerde opslag in bins (verschillende items in één bin). Bij een explosief opslagbeleid wordt een inkomende bulk gescheiden in kleine groepen die in elke bak in het magazijn kunnen worden opgeslagen. Naarmate de bestellingen binnenstromen, vergroot deze voorraadspreiding de kans dat een picker meerdere bestelde artikelen binnen een korte afstand kan lokaliseren. De dynamische bevoorradingsbeslissing is dan waar de aankomende voorraadgroepen moeten worden opgeslagen, zodat pickalgoritmen efficiëntere picklijsten kunnen genereren en het doel voor snelle uitvoering kunnen bereiken. Het artikel presenteert eerst een doelfunctie voor het dynamische opslaglocatieprobleem en formuleert het vervolgens als een mixed integer programmeer probleem. De twee belangrijke beslissingen die ondersteund worden door het model zijn (1) waar de inkomende voorraad moet opgeslagen worden en (2) van welke locatie de binnenkomende orders moeten worden verzameld (gepicked). Ook moet er bij het binnenkomen van bestellingen beslist worden waar en wanneer de artikels worden gepicked. Er worden twee heuristieken ontwikkeld die het probleem op een tijdbesparende manier oplossen.

(Kong et al., 2016) bespreken de operationele werking in een veilingcentrum. Het doel van deze paper is het plannen van veilingen van bederfelijke goederen (perishable goods) met behulp van het PI. Veilingen worden veel gebruikt voor het snel verhandelen van bederfelijke producten om een eerlijke en transparante prijs te bereiken, vooral voor landbouwproducten zoals bloemen en verse vis. De meeste kernactiviteiten vinden plaats in een gecentraliseerd veilinglogistiek centrum (ALC) waar de veilingproducten van hun inkomende- leveranciers naar hun uitgaande leveranciers worden overgebracht. Hoewel dit een eerder specifiek probleem is wordt een veilingcentrum in deze thesis ook beschouwd als een mogelijke hub in een  $\Pi$ -netwerk en valt dus onder de subcategorie 'operationele planning binnen de hubs'. De beslissingen die worden genomen door de plannings- en controlefuncties hebben een grote impact op de ALC-operaties. Controle applicaties gaan over de real-time uitvoering van seconden tot minuten. In deze paper wordt een planningsoplossing uitgewerkt om het dagelijkse besluitvormingsproces bij het ALC te vergemakkelijken. Het probleem gaat over het toewijzen van werkmiddelen om geplande veilingopdrachten in de loop van de tijd uit te voeren en tegelijkertijd aan een aantal criteria te voldoen. Voorbeelden van werkmiddelen zijn

laadmachines, logistieke teams, veilingklokken etc. De auteurs volgen het Hybrid flowshop (HFS)-classificatieschema geïntroduceerd in Ruiz et al. (2010) en het probleem kan dus worden gecategoriseerd in een standaard twee-stage HFS probleem. HFS is een algemene productieomgeving waarin een set van  $n$  taken moeten verwerkt worden in  $m$  stappen door gegeven doelfuncties te optimaliseren. In de eerste stap worden een operatieplanningsmechanisme toegepast. In de tweede stap worden bepaalde regels toegepast om beslissingen te ondersteunen zoals welke veilingkar aan welke veilingklok wordt toegewezen. De toepassing van het PI op dit probleem zit in het gebruik van  $\Pi$ -veilingkarren. Deze worden gebruikt om goederen te verplaatsen. Net zoals de  $\Pi$ -containers zijn deze  $\Pi$ -veilingkarren gestandaardiseerd, slim, en ecologisch en modulair binnen de ALC's. Er wordt een wiskundig model geformuleerd, maar aangezien dit probleem NP-hard is, wordt er een heuristiek ontwikkeld om tot oplossingen te komen. Deze heuristiek bestaat uit verschillende beslissingsregels die gaan over de picking-strategieën en dispatch regels. Deze regels kunnen makkelijk worden toegepast in de praktijk. Voorbeelden zijn de first-come-first-serve regel, die zegt dat goederen die die eerst binnenkomen eerst verwerkt worden en shortest-processing-time, die zegt dat goederen die het minst tijd nodig hebben om verwerkt te worden, eerst behandeld worden.

als laatste bespreken (Lin et al., 2014) de selectie van modulaire containers binnen  $\Pi$ -hubs.

De standaardisatie van verpakkingen en containers voor productbehandeling heeft potentiële voordelen op het gebied van transport, materiaal omgangs- en milieuaspecten. Gestandaardiseerde modulaire containers spelen een belangrijke rol in het PI. Om de implementatie van standaard modulaire containers te ondersteunen, wordt in deze paper een wiskundig model ontwikkeld om een vereist aantal modulaire containers te selecteren om een reeks producten te verpakken om zo de ruimtebenutting te maximaliseren. Hiervoor wordt een integer programmeer model geformuleerd. Meer specifiek is het doel van het model om een geschikte set modulaire containerafmetingen te bepalen voor het verpakken van een set van unieke producten, zodat elk product wordt toegewezen aan een enkele modulaire containermaat van hetzelfde product. Het aantal artikelen per container wordt beperkt door een vooraf gedefinieerd aantal. Winkels kunnen beperkingen opleggen aan de hoeveelheid artikelen per container om te voldoen aan de voorraadniveaus in de winkel, en de hoeveelheidsbeperking zorgt ervoor dat aan deze vereisten wordt voldaan. De beslissingen/doelen van het model zijn de volgende: (1) De afmetingen van de containers bepalen voor bepaalde producten (2) Het toewijzen van producten aan deze modulaire containers (3) Het opstellen van een verpakkingsplan voor elk product in deze modulaire containers (4) Het bepalen van de hoeveelheid producten dat kan verpakt worden in de geselecteerde container en het bijhorende volume (5) Het minimaliseren van het niet-gebruikte volume bij de versturing. Het wiskundig model is ook hier echter een NP-hard probleem. Daar komt ook bij dat wanneer het aantal containers dat in overweging wordt genomen gaat stijgen, wordt het model nog complexer. Dit model kan dus niet exact worden opgelost door solvers zoals CPLEX. Om deze reden wordt er een decomposition-based solution toegepast. Hierbij wordt het model opgedeeld in twee problemen: (1) het hoofdprobleem en (2) het sub-probleem. Het hoofdprobleem is analoog met een klassiek toewijzigingsprobleem. Dit

is een optimalisatieprobleem dat oplosbaar is als al de nodige data beschikbaar is. Dit is echter niet altijd het geval. Er wordt dus nog een heuristiek ontwikkeld die deze data genereert.

### **3.3 Toewijzing transport orders aan uitvoerders**

In de laatste subcategorie worden twee papers besproken die gaan over het toewijzen van transportorders aan uitvoerders.

(Yao, 2017) bespreekt een one-stop-bezorgmethode op basis van het PI, waarbij meerdere fysieke links doorkruist worden in een toeleveringsketen voor online winkels. Het doel van de paper is om de problemen van hoge kosten in verschillende logistieke schakels en het risico van achterstand of tekort van voorraad in de traditionele toeleveringsketens voor online winkels op te lossen.

De studie analyseert het werkingsmechanisme van one-stop-bezorging bij online winkels gebaseerd op het PI en analyseert het bijhorende optimalisatie probleem en doelstellingen van one-stop-bezorgplanning. One-stop-delivery kan als volgt worden uitgelegd: Wanneer retailers bij groothandelaren kopen of groothandelaren bij fabrikanten kopen, moeten zij alleen met elkaar een koopovereenkomst sluiten. Ze hoeven de echte goederen niet naar groothandelaren of detailhandelaren te verzenden. Door middel van one-stop-levering kan niet alleen de diversiteit van de verkochte goederen van de groothandelaren of detailhandelaren gegarandeerd worden, maar ook de voorraad en logistieke activiteiten in de groothandel of detailhandel verminderd worden om de logistieke kosten te verlagen en de risico's van logistieke activiteiten te verkleinen. Het PI is nuttig in zo een systeem, vooral door het gebruik van  $\Pi$ -containers. 3PL's of andere belangrijke leveringsinstanties met de  $\Pi$ -technologie en eenheidscontainers verpakken de goederen volgens de klantorders in geschikte eenheidscontainers van de fabrikanten en leveren de goederen rechtstreeks aan de klanten. In dit proces worden de goederen alleen op de productielocaties verwerkt, in de overeenkomstige eenheidscontainers verpakt, uit de containers gehaald en naar de consumenten verzonden. In de keten van transport en levering zijn de  $\Pi$ -containers, in plaats van de goederen, de basisobjecten van de logistieke activiteiten. Samenvattend is de kernwaarde van PI het onderling verbinden van onafhankelijke logistieke netwerken of diensten, d.w.z. het creëren van een gedeeld en open logistiek netwerk, met behulp van  $\Pi$ -containers. De operationele efficiëntie van dit gedeelde en open logistieke netwerk vereist echter de rationele planning van alle logistieke middelen, ook de  $\Pi$ -containers. Daarom is het kernprobleem van dit artikel de planningsoptimalisatie van  $\Pi$ -containers door het netwerk. De belangrijke beslissing die moet genomen worden is het toewijzen van leveringstaken aan deze  $\Pi$ -containers. Er wordt een wiskundig model geformuleerd om deze planning te ondersteunen, als ook een algortime om oplossingen te verbeteren.

De tweede paper (Ghaderi et al., 2022) werd eerder al besproken bij de hoofdcategorie 'strategisch planningsniveau'. Er worden dus zowel strategische als operationele beslissingen ondersteund.

In deze paper wordt gekeken naar een crowdshipping systeem waarin een online platform leveringsaanvragen binnenkrijgt en vervolgens gepaste crowdshippers (CS) identificeert, die hun interesse voor het uitvoeren van leveringen hebben geregistreerd. De CS haalt het pakket op bij de oorsprong, en brengt het naar de gewenste locatie. De CS wordt hiervoor dan betaald.

Naast de strategische problemen wordt er ook een belangrijk operationeel probleem besproken, namelijk het toewijzen van transporttaken aan uitvoerders (crowdshippers) voor zowel enkele als gezamenlijke leveringen en, alleen voor gezamenlijke levering, het identificeren van geschikte parcel lockers voor pakketoverdracht. De beslissingen die voor elke taak moeten gemaakt worden zijn; de keuze tussen gezamenlijke of enkele levering, de identificatie van één of meerdere CS's, en de selectie van de overdrachtlocatie. Er wordt een lineair programmeringsprobleem gemodelleerd om dit operationeel probleem op te lossen. Vervolgens wordt een twee-fase algoritme ontwikkeld dat dient om de taken (jobs) te matchen met CS's. In de eerste fase wordt voor elke taak de potentiële CS's gezocht en opgeslaan. Deze worden vervolgens verdeeld over de verschillende taken. In de tweede fase probeert het algoritme één taak aan verschillende CS's toe te wijzen voor gezamenlijke levering. Deze algoritmes worden getest in een case study die gebruik maakt van een dataset die bestaat uit 12000 taken met 3000 beschikbare CS's. De kandidaat locaties voor de parcels zijn afkomstig uit 222 supermarktlocaties (SML's) in Melbourne grootstedelijk gebied.

### 3.4 Oplossingsmethoden

Onderstaande tabel geeft kort weer welke oplossingsmethoden er worden gebruikt voor de modellen in de literatuur, en of deze oplossingen werden getest aan de hand van een gevalstudie (gebaseerd op het echte leven) of een 'numerical example' (fictieve gegenereerde data).

| Authors                                             | Exact     | Heuristiek/algorithm | Simulatie | Case study | numerical example |
|-----------------------------------------------------|-----------|----------------------|-----------|------------|-------------------|
| <b>Routing</b>                                      |           |                      |           |            |                   |
| Ben Mohamed et al. 2017                             |           | x                    |           | x          |                   |
| Puskás et al. 2020                                  |           | x                    |           |            | x                 |
| Shi et al. 2020                                     |           | x                    |           | x          |                   |
| Ancele et al. 2021                                  | x (CPLEX) | x                    |           |            | x                 |
| Luo et al. 2021                                     | x (CPLEX) | x                    |           |            | x                 |
| Briand et al. 2022                                  |           |                      | x         |            |                   |
| Arnau et al. 2022                                   |           | x                    | x         |            | x                 |
| Luo et al. 2022                                     |           |                      |           |            |                   |
| Lin et al. 2022                                     |           | x                    | x         | x          |                   |
| Li et al. 2022                                      | x (CPLEX) | x                    |           |            | x                 |
| <b>Operationele planning hubs</b>                   |           |                      |           |            |                   |
| Chargui T. et al. 2022                              |           | x                    |           |            | x                 |
| Walha F. et al. 2016                                |           | x                    |           |            | x                 |
| Zhang J. et al. 2020                                |           | x                    | x         |            | x                 |
| Kong X. et al. 2016                                 |           |                      |           |            |                   |
| Lin Y. et al. 2014                                  | x         | x                    |           | x          |                   |
| <b>Toewijziging transportorders aan uitvoerders</b> |           |                      |           |            |                   |
| Yao J. et al. 2017                                  |           | x                    |           | x          |                   |
| Ghaderi H. et al. 2022                              | x         | x                    |           |            |                   |

Tabel 3. Oplossingsmethoden voor modellen in het operationeel planningsniveau

### 3.5 $\Pi$ - kenmerken op operationeel niveau

Tabel 4 geeft een overzicht van de voornaamste kenmerken en eigenschappen van het PI die worden toegepast in de papers die behoren tot het operationele niveau. Deze kenmerken zijn gebaseerd op de 13 kenmerken die aanbod komen in (Montreuil, 2011) en Montreuil, (2013). In de eerste kolom wordt ook nog de context van de paper gegeven. Hier kan echter vooral onderscheid worden gemaakt tussen een algemene context, wat wil zeggen dat de modellen in verschillende situaties kunnen worden toegepast, en een specifiek context zoals bijvoorbeeld stedelijke logistiek of e-commerce. De volgende drie kolommen gaan over de  $\Pi$ -elementen ( $\Pi$ -container,  $\Pi$ -voertuig en  $\Pi$ -hub) die eerder werden omschreven in de inleiding. Deze zullen vanaf hier samen worden gezet onder de naam 'infrastructuur'. In sommige papers worden al deze elementen gebruikt, in andere deels en soms worden ze zelfs niet expliciet vermeld. De kolommen die daarop volgen bevatten bepaalde eigenschappen die herhaaldelijk aan bod komen in de verschillende bronnen. Onder de tabel zal worden besproken hoe de auteurs deze eigenschappen toepassen om modellen te creëren die het PI representeren. Dit kan in de vorm van bepaalde assumpties zijn, maar ook in de manier waarop netwerken worden gemodelleerd, zoals verder duidelijk zal worden. Ook wordt er vermeld wat de gevolgen zijn van het meenemen van deze kenmerken in de modellen, als dit werd vermeld in de paper.

| Bron (per subcategorie)                             | Context         | $\Pi$ -container | $\Pi$ -voertuig | $\Pi$ -hub | Dynamisch | Multi-vehicle | Open hubs | Interconnectivity | Gelijktijdig ophalen/bezorgen | Digital connectivity |
|-----------------------------------------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------|-----------|---------------|-----------|-------------------|-------------------------------|----------------------|
| <b>Routing</b>                                      |                 |                  |                 |            |           |               |           |                   |                               | 5                    |
| Ben Mohamed et al. 2017                             | Stedelijk       | x                |                 |            | x         |               | x         | x                 | x                             |                      |
| Puskás et al. 2020                                  | Plaatooning     |                  | x               |            |           |               | x         |                   |                               | x                    |
| Shi et al. 2020                                     | e-commerce      |                  |                 |            | x         |               |           | x                 |                               | x                    |
| Ancele et al. 2021                                  | Algemeen        |                  |                 | x          |           | x             | x         |                   | x                             |                      |
| Luo et al. 2021                                     | Stedelijk       |                  |                 |            |           |               |           |                   |                               |                      |
| Briand et al. 2022                                  | Algemeen        | x                | x               | x          | x         |               | x         | x                 |                               |                      |
| Arnau et al. 2022                                   | Algemeen        |                  |                 |            | x         | x             |           | x                 |                               |                      |
| Luo et al. 2022                                     | Stedelijk       | x                | x               | x          |           |               | x         | x                 | x                             |                      |
| Lin et al. 2022                                     | Meals-on-wheels | x                |                 |            |           |               |           |                   | x                             | x                    |
| Li et al. 2022                                      | Algemeen        | x                | x               | x          |           | x             | x         |                   |                               |                      |
| <b>Operationele planning hubs</b>                   |                 |                  |                 |            |           |               |           |                   |                               |                      |
| Chargui T. et al. 2022                              | Algemeen        |                  |                 | x          |           | x             | x         |                   |                               |                      |
| Walha F. et al. 2016                                |                 | x                | x               | x          | x         |               |           |                   |                               |                      |
| Zhang J. et al. 2020                                | Algemeen        |                  |                 | x          | x         |               |           |                   |                               |                      |
| Kong X. et al. 2016                                 |                 |                  |                 |            | x         |               | x         | x                 |                               | x                    |
| Lin Y. et al. 2014                                  |                 | x                |                 |            |           |               |           |                   |                               |                      |
| <b>Toewijziging transportorders aan uitvoerders</b> |                 |                  |                 |            |           |               |           |                   |                               |                      |
| Yao J. et al. 2017                                  | e-commerce      | x                |                 |            |           |               |           | x                 |                               | x                    |
| Ghaderi H. et al. 2022                              | Stedelijk       |                  |                 |            |           | x             |           | x                 |                               |                      |

Tabel 4.  $\Pi$ -kenmerken in operationele bronnen

In tabel 4 kan worden afgelezen dat er bepaalde  $\Pi$ -kenmerken vaker worden besproken in de verzamelde literatuur dan anderen. Het meest besproken kenmerk is de infrastructuur, ofwel de  $\Pi$ -container, het  $\Pi$ -voertuig of de  $\Pi$ -hub. Twaalf van de 17 bronnen nemen ten minste één van deze kenmerken mee in hun model. Natuurlijk is het vaak zo in de literatuur dat wanneer gesproken wordt over  $\Pi$ -containers, er ook vanuit wordt gegaan dat deze worden behandeld in  $\Pi$ -hubs, en worden vervoerd door  $\Pi$ -voertuigen. Deze drie kenmerken hangen dus vaak samen, zonder dat ze daarom apart worden besproken tot in detail. De reden dat deze kenmerken opgesplitst worden in de tabel, is omdat er papers zijn die wel over slechts één van deze kenmerken gaan, zoals bijvoorbeeld in Lin et al. (2022), waar een model voor de selectie van  $\Pi$ -containers wordt opgesteld voor een gegeven groep producten waarbij leeg volume wordt geminimaliseerd. Ook Yao et al. (2017) bespreken vooral de voordelen van het gebruiken van  $\Pi$ -containers in hun model. Ze noemen twee karakteristieken van de  $\Pi$ -containers die belangrijk zijn bij een one-stop delivery model (zie sectie 3.1). Eerst en vooral zijn ze makkelijker om te behandelen (transport, opslag, inladen, uitladen etc.), ten tweede zijn ze voorzien van een unieke wereldwijde identificatie die zowel fysiek als digitaal verbonden is aan de container, waardoor identificatie robust en efficiënt is. In hun model worden de goederen alleen op de productiepunten verwerkt, verpakt in de bijbehorende  $\Pi$ -containers, uit de containers gehaald en naar de consumenten gestuurd. Tijdens het transport en de levering zijn de  $\Pi$ -containers, in plaats van de goederen, de basisobjecten van de logistieke activiteiten. De auteurs concluderen dat er veel voordelen zijn aan one stop delivery in een  $\Pi$ -context, maar dat er bepaalde voorwaarden zijn, bijvoorbeeld dat de product categorieën gelijkaardig moeten zijn en de klantgroepen dicht bij elkaar moeten gelegen zijn. Chargui et al. (2022) bespreken dan weer de  $\Pi$ -hubs, en meer specifiek de  $\Pi$ -crossdocks. De kenmerken worden vergeleken met klassieke crossdocks. Volgens hen zijn er twee belangrijke verschillen. Ten eerste kunnen producten die door het  $\Pi$ -crossdock komen eigendom zijn van verschillende  $\Pi$ -gebruikers, en niet enkel van een bepaald bedrijf. Ten tweede worden er in een  $\Pi$ -crossdock enkel universele  $\Pi$ -containers behandeld, tegenover verschillende logistieke eenheden (paletten etc). Hun model toont aan dat het  $\Pi$ -crossdock mogelijk duurzamer kan zijn dan het klassieke crossdock wanneer de juiste technologieën worden toegepast. Walha et al. (2016) halen dezelfde verschillen aan in hun paper waar een  $\Pi$ -road-rail wordt vergeleken met klassieke road-rail terminals. Hier komt nog bij dat opslagruimte bij de klassieke hubs regelmatig benut wordt, terwijl containers in  $\Pi$ -hubs meestal meteen worden verplaatst naar vrachtwagens zonder tussentijdse opslag.

Naast de infrastructuur zijn er drie  $\Pi$ -kenmerken die in het algemeen het vaakst worden toegepast in de literatuur, namelijk de dynamische aard, de open hubs en de interconnectiviteit, met respectievelijk 7, 8 en 8 van de 17 bronnen die deze  $\Pi$ -kenmerken bespreken. De dynamische aard van het  $\Pi$ -netwerk wordt vooral omschreven als de nood van het netwerk om in real time te reageren op problemen en variabele vraag. Ben Mohamed et al. (2017) realiseren dit in hun model door een multi-period setting toe te passen. Dit wil zeggen dat ze ervan uitgaan dat het netwerkproblemen kan ondervinden gedurende de dag doordat er veel verkeer is in de stad en omdat er steeds meer mensen zijn die dezelfde dag of via verschillende kanalen (bijvoorbeeld online) willen laten bezorgen. Dit wordt gedaan door een typische werkdag op te delen in verschillende tijdsvensters of periodes. Deze periodes zijn onderling verbonden zodat verschillende transportaanvragen kunnen worden

uitgesteld van de ene naar de andere periode binnen een werkdag, waardoor het probleem dynamisch wordt. Briand et al. (2022) merken op dat deze dynamische aard van het PI ervoor zorgt dat er een nieuwe manier van prijsonderhandeling moet zijn tussen verladers en vervoerders. Een protocol gebaseerd op veilingen wordt opgesteld. In het PI zijn netwerken onderling verbonden dus in elk knooppunt moet opnieuw onderhandeld worden om de lading naar het volgende knooppunt te brengen. Dit model wordt vergeleken tegenover een scenario zonder PI, dus waar enkel moet onderhandeld worden voor het eindknooppunt, en niet voor elk tussenliggend knooppunt. De simulatie toont aan dat er een duidelijke daling in transportkosten is bij het  $\Pi$ -model, en ecologische voordelen doordat het vervoer van lege containers wordt verminderd. Ook in het model van Arnau et al. (2022) zijn er op voorhand geen vaste routes naar de eindbestemming beschikbaar. Aangezien de dynamische aard het moeilijk maakt om de exacte oplossing snel te berekenen wordt er een heuristiek ontwikkeld die tot optimale oplossingen leidt voor kleine probleemgroottes. Walha et al. (2016) omschrijven het dynamisch aspect als verschillende verstoringen die kunnen plaatsvinden zoals onderhoud, het stuk gaan van machines, en andere zaken die de werking verstoren. In hun model wordt dit vertaald als docks binnen de  $\Pi$ -hub die tijdelijk niet beschikbaar zijn om containers te verwerken. Zhang et al. (2020) bespreken dan weer het dynamisch aspect van F-Magazijnen (vervullingsmagazijnen), deze zijn namelijk zeer variabel wat betreft wat, waar en hoeveel voorraad er wordt opgeslagen. Om deze reden wordt er een dynamisch beslissingsmodel uitgewerkt dat zowel voorraadbepalingen als picking-beslissingen ondersteunt. Shi et al. (2020) beschrijven een model dat gebruik maakt van een dynamisch centraal systeem dat in real-time alle logistieke informatie verzamelt en verwerkt. Hierdoor kunnen de bezorgers hun routes optimaliseren en snel reageren op veranderingen. Dit centraal systeem is ook een goed voorbeeld van digital connectivity (laatste kolom in tabel 1.) Andere voorbeelden van digital connectivity zijn; het systeem waarmee voertuigen die deel uitmaken van platoons met elkaar communiceren Puskas et al. (2020), en de slimme lockers in het MOW systeem van Lin et al. (2022).

Het hebben van open hubs die beschikbaar zijn voor alle  $\Pi$ -gebruikers wordt in 8 van de 17 papers opgenomen in de modellen, en hangt vaak samen met de interconnectiviteit in de netwerken en tussen verschillende knooppunten (hubs). Dit zijn dan ook 2 van de 13 belangrijke  $\Pi$ -kenmerken beschreven door Montreuil (2011). In het model van Ben Mohamed et al. (2017) worden bijvoorbeeld meerdere distributiecentra gebruikt om goederen te bezorgen. Een voertuig kan hierbij meerdere pakketten tegelijkertijd ophalen en afleveren, en hoeft niet altijd bij hetzelfde distributiecentrum te stoppen. Als het handiger en efficiënter is, kan het voertuig naar een ander distributiecentrum gaan. Ook Puskas et al. (2020) stellen alle beschikbare hubs in het netwerk open voor alle  $\Pi$ -gebruikers in hun model voor samenwerking van platoons. Ook wordt hier de assumptie gemaakt dat alle voertuigen in het platoon met elkaar communiceren doormiddel van digitale toepassingen. Dit model wordt vergeleken met een eerder model van dezelfde auteurs, waarin deze assumpties niet worden gemaakt. In dit vorige model zonder samenwerking en zonder de  $\Pi$  kenmerken zijn niet alle routes in het netwerk voor alle spelers

beschikbaar. In het huidige  $\Pi$ -model wordt het netwerk versoepeld aangezien het  $\Pi$ -netwerk volledig interconnected is en informatie openlijk kan gedeeld worden. De auteurs concludeerden dat,

wanneer veel platoons worden aangemaakt, de samenwerking de moeite waard is tegenover het model zonder samenwerking, en dat de prestaties beter worden naargelang er meerdere voertuigen in het systeem zitten. Ook in het innovatief systeem van Shi et al. (2020) werken bezorgers van verschillende soorten bedrijven (O2O en B2C, zie sectie 3.1) samen. Hierdoor kunnen de bezorgers efficiënter gebruik maken van hun tijd en capaciteit. Door deze nieuwe methode te vergelijken met de traditionele manier van bezorgen, wordt aangetoond dat dit nieuwe systeem beter werkt bij grotere bestellingen en dat het bovendien duurzamer is omdat er minder uitstoot van broeikasgassen is. Dit onderzoek draagt bij aan het klassieke VRP aangezien het rekening houdt met de real time vraag naar bezorging, en ook gebruik maakt van digitale verbinding om de bezorging efficiënter te maken. Dit werkt als volgt: eerst en vooral worden de gegevens van klanten, verkopers, het bezorgcentrum en bezorgers snel vastgelegd via digitale communicatie en sensoren. Deze gegevens worden naar het centrale dispatching systeem gestuurd. Vervolgens verwerkt het systeem de realtime gegevens en worden de optimale routes voor de bezorgers op basis van hun locatie en capaciteit bijgewerkt. Ten slotte wordt de nieuwe bestelling toegewezen aan een geschikte bezorger. De bijgewerkte bezorgroutes en de geschatte bezorgtijd worden naar de bezorger gestuurd. Ondertussen synchroniseert de bezorger zijn locatie met het centrale systeem en kan de klant de realtime logistieke informatie opvragen. Hierdoor kunnen bezorgers hun routes beter plannen en de pakketjes sneller afleveren. Ook (Ancele et al. 2021) nemen het concept van open hubs mee op in hun uitgebreid VRP (Vehicle routing problem). Daarnaast worden er in hun model meerdere soorten voertuigen gebruikt en ladingen uitgewisseld op meerdere faciliteiten om klanten binnen tijdvensters tevreden te stellen. Ook het samenwerken met externe transportmiddelen wordt in overweging genomen. Aangezien een voertuig van een externe firma kan zijn, is het beschikbaar voor een bepaalde periode en kan het een open route hebben of zijn route beëindigen op een ander depot. Daarnaast wordt ook het hebben van gemengde ophaal- en bezorgopdrachten in het model toegepast, waarbij voertuigen het ophalen van lege containers combineren in routes samen met het bezorgen van goederen. Dit kenmerk wordt ook opgenomen in de papers van ondermeer Ben Mohamed et al. (2017), Luo et al. (2022), en Lin et al. (2022). Bij Lin et al. (2022) wordt dit echter gerealiseerd door gebruik van slimme lockers en een  $\Pi$ -beheersysteem, geïntegreerd in leveringsmodellen voor het MOW (meals-on-wheels) concept. De  $\Pi$ -containers zijn recycleerbaar en worden terug meegenomen na de levering. De smart-lockers worden gebruikt om de  $\Pi$ -containers tijdelijk in op te slaan. Deze modellen worden vergeleken met de conventionele leveringsmodellen op basis van totale kosten en levertijd. De auteurs concluderen dat de adoptie van de  $\Pi$ -kenmerken een positief effect heeft op al de modellen. Luo et al. (2022) maken ook een model waar steden voorzien zijn van open en standaard hubs die verschillende logistieke centra met elkaar verbinden. Ook in dit model kunnen de lege containers indien nodig tijdens de een route verzameld en teruggebracht worden naar de beginlocatie. Na het vergelijken met een conventioneel model (zonder PI) kunnen de auteurs concluderen dat het  $\Pi$ -model voordeliger is wanneer de klantlocaties meer verspreid zijn. Ook werd geconcludeerd dat het verhogen van het aantal  $\Pi$ -hubs ervoor zorgt dat het effect van vraagfluctuaties lager is. Dit effect vermindert echter wanneer er meer klanten in het netwerk zitten. Ook in het model van Li et al. (2022) worden geselecteerde verzoeken door meerdere voertuigen achtereenvolgens vervoerd en overgedragen van het ene voertuig naar het andere op tussenliggende hubs, voordat ze uiteindelijk op de bestemming aankomen. Het voordeel van deze

aanpak is volgens de auteurs dat lege terugkeerbewegingen van voertuigen gecombineerd kunnen worden met het vervoeren van klantverzoeken om zo de match tussen vraag en aanbod te maximaliseren. Dit is gelijkaardig met de bevindingen van Ben Mohamed et al. (2017), Ancele et al. (2021) en Lin et al. (2022). Een andere studie die is gebaseerd op het idee van het PI waarbij meerdere voertuigen gebruikt worden om een pakket naar de eindbestemming te brengen, met  $\Pi$ -hubs als tussenstops is Ghaderi et al. (2022). Zij stellen het concept van collaboratieve crowdshipping voor, wat betekent dat last mile delivery kan worden uitgevoerd met meer dan één crowdshipper, waarbij gebruik wordt gemaakt van pakketkluisjes als uitwisselingspunten. Er wordt geconcludeerd het gebruik van deze pakketkluisjes in een crowdshipping netwerk zorgt voor een kortere afstand tussen de afleverpunten en een betere geografische dekking. Dit betekent dat er minder tijd en afstand nodig is om de pakketjes af te leveren, wat efficiënter is. Uit numerieke analyses op grote datasets bleek dat het toestaan van gezamenlijke levering de succesvolle bezorgingsgraad tot 5% kan verbeteren.

Hieruit kan worden geconcludeerd dat de operationele bronnen eerst en vooral rekening houden met de infrastructuur van het PI, aangezien 12 van de 17 bronnen ten minste één van de drie onderdelen van de infrastructuur, zijnde de  $\Pi$ -containers,  $\Pi$ -hubs en  $\Pi$ -voertuigen, opnemen in hun modellen. Over de  $\Pi$ -containers kan in het algemeen gezegd worden dat deze, in de plaats van goederen zelf als de basisobjecten van de logistieke activiteiten zijn worden gebruikt in de modellen. De bronnen die specifiek over  $\Pi$ -hubs spreken concludeerden in het algemeen dat de  $\Pi$ -hubs duurzamer zijn in hun werking dan klassieke crossdocks, wat het belang van dit  $\Pi$ -kenmerk bevestigt. De twee kenmerken die vervolgens het meest besproken worden zijn de open hubs en de interconnectiviteit, deze worden vermeld in 8 van de 17 bronnen. Het gaat hier dan vooral over de mogelijkheid om meerdere hubs te gebruiken voor het transport van goederen, maar ook over de samenwerking tussen verschillende spelers in het PI. Deze kenmerken hebben als belangrijk gevolg dat er informatie openlijk kan gedeeld worden, waardoor planningen ook efficiënter zijn, zowel op vlak van routes als in de hubs. In de meeste gevallen zorgt dit voor een efficiënter en duurzamer resultaat, hoewel er ook wordt aangehaald dat dit kan afhangen van hoeveel hubs/voertuigen/spelers er beschikbaar zijn in het PI en bereid zijn om samen te werken. Ook de met de dynamische aard van het PI wordt in 7 van de 12 bronnen rekening gehouden. Dit gaat over de nood van het netwerk om in real-time te reageren op veranderingen in de vraag, plotse onbeschikbaarheid van routes, voertuigen en hubs door externe omstandigheden zoals het klimaat, beschadiging en andere problemen. Verschillende papers vergelijken dynamische  $\Pi$ -modellen met klassiekere modellen, en besluiten over het algemeen dat de dynamische modellen resulteren in lagere transportkosten en ecologische voordelen, aangezien in veel gevallen het transport van lege vrachtwagens wordt geminimaliseerd. Tot slot worden de kenmerken multi-vehicle en digitalisatie minder besproken, met beide 5 vermeldingen in de literatuur. Onder digitalisatie vallen vooral concrete toepassingen die andere kenmerken zoals de dynamische aard en interconnectiviteit zouden moeten ondersteunen. Hoewel er veel goede voorbeelden worden gegeven, kan het nuttig zijn voor de praktische adoptie van het PI, om in toekomstig onderzoek meer van deze concrete toepassingen te bespreken

## 4. Conclusie

Het doel van deze scriptie is om belangrijke literatuur rond het Physical Internet te structureren en samen te vatten om toekomstig onderzoek te ondersteunen. Om dit te doen werd de literatuur eerst en vooral opgedeeld in twee hoofdniveaus's, namelijk het strategische/tactische planningsniveau en het operationele planningsniveau. In het strategisch/tactisch planningsniveau wordt het fysieke netwerk ontworpen en worden de routes in het netwerk bepaald. De tijdshorizon waarin beslissingen worden genomen bedraagt 1 tot 5 jaar. In het operationeel planningsniveau worden beslissingen wekelijks en zelfs dagelijks genomen. Deze beslissingen zijn gedetailleerd en gaan voornamelijk over routing van voertuigen door het netwerk en het toewijzen van vracht aan transportbedrijven. Van de 24 gebruikte bronnen behoren er 9 tot het strategische/tactische niveau, en 17 tot het operationele niveau. Een eerste vanzelfsprekende conclusie is dus dat de grote meerderheid van de verzamelde literatuur operationele problemen in de context van het PI bespreken. Vervolgens werd er per niveau gekeken naar welke soort logistieke problemen er in de literatuur worden besproken.

In het strategische/tactische niveau worden voornamelijk problemen besproken die gaan over netwerk design, aangezien dit in 7 van de 9 bronnen aan bod komt. Network Design bepaalt de fysische configuratie en infrastructuur van de toeleveringsketen. Belangrijke beslissingen rond het aantal en de locatie van magazijnen/(PI)-hubs worden hier genomen. De overige 2 bronnen gaan over prijsmechanismen gebaseerd op veilingen. Prijsmechanismen dienen om transportaanvragen te linken aan het beschikbaar aanbod van verladers, met als uitkomst een prijs. Om efficiënt over prijzen te kunnen onderhandelen, wordt er in de literatuur gebruik gemaakt van veilingen.

In het operationele niveau komen de routeringsproblemen het meest aan bod, met 10 van de 17 bronnen die hieronder vallen. In de literatuur worden dit soort problemen vaak 'vehicle routing problems' (VRP) genoemd waarbij het doel is om goederen aan een aantal klanten met gekende vraag te leveren doormiddel van routes die vertrekken en eindigen op hetzelfde depot en met minimale kosten. Het op een na meest voorkomende probleem in de literatuur is de operationele planning in hubs, waar 5 van de 17 bronnen onder vallen. De overige twee bronnen gaan over het toewijzen van transportorders aan transportfirma's.

Over het algemeen kan dus worden geconcludeerd dat het ontwerpen van logistieke netwerken en het routeren van voertuigen doorheen deze netwerken de problemen zijn die het meest worden besproken in de  $\Pi$ -literatuur. Vervolgens werd er gekeken naar welke kenmerken van het Physical Internet er werden opgenomen bij het modelleren van deze problemen. Dit werd ook per planningsniveau gedaan.

Uit de bevindingen in het strategische/tactische niveau kan geconcludeerd worden dat er voornamelijk rekening wordt gehouden met interconnectiviteit en het gebruik van een wereldwijd open supplyweb. Deze kenmerken worden toegepast in acht van de negen bronnen. In de literatuur wordt dit voornamelijk bereikt door netwerken te ontwerpen waarbij alle knooppunten (hubs) met

elkaar verbonden zijn, zodat alle routes beschikbaar zijn voor het transport van  $\Pi$ -containers. Bovendien worden deze verschillende routes toegankelijk gemaakt voor alle spelers in het model. Dit sluit aan bij het concept van Montrueil, die het wereldwijd open supplyweb beschrijft als een wereldwijd open web van productiecentra, distributiecentra, magazijnen, hubs en transitcentra. Hier kunnen producenten, distributeurs en retailers hun producten met  $\Pi$ -containers dynamisch inzetten op verschillende geografisch verspreide centra. De infrastructuur speelt een rol in zes van de negen bronnen, met name met betrekking tot de  $\Pi$ -hubs die fungeren als knooppunten in de netwerken. Daarnaast wordt in drie van de negen bronnen de nadruk gelegd op de dynamische aard en samenwerking tussen bedrijven. De dynamische aard van het PI wordt voornamelijk omschreven als het gebruik van real-time data bij de planning in de  $\Pi$ -hubs, het aanpassen van routes in het netwerk en het bepalen van de prijsstrategie. Over het algemeen concluderen de literatuurbronnen dat het opnemen van deze kenmerken in de netwerkmodellen positieve effecten heeft ten opzichte van traditionele modellen, wat het belang van het PI aantoont.

Uit de bevindingen in het operationele niveau kan worden geconcludeerd dat er in eerste instantie rekening gehouden wordt met de infrastructuur. Van de 17 onderzochte bronnen nemen 12 bronnen minstens één van de drie componenten van de  $\Pi$ -infrastructuur - namelijk  $\Pi$ -containers,  $\Pi$ -hubs en  $\Pi$ -voertuigen - op in hun modellen. Wat betreft de  $\Pi$ -containers kan gesteld worden dat deze dienen als de basisobjecten van de logistieke activiteiten, in plaats van de goederen zelf, volgens de modellen die zijn onderzocht. De bronnen die specifiek over  $\Pi$ -hubs spreken, concluderen over het algemeen dat deze duurzamer zijn in vergelijking met conventionele crossdocks, wat het belang van dit kenmerk van het PI bevestigt.

De twee meest besproken kenmerken zijn vervolgens de open hubs en interconnectiviteit, die worden vermeld in 8 van de 17 bronnen. Hierbij gaat het voornamelijk om de mogelijkheid om meerdere hubs te gebruiken voor goederentransport, evenals de samenwerking tussen verschillende spelers in het PI. Deze kenmerken resulteren in het openlijk delen van informatie, wat leidt tot efficiëntere plannings op het gebied van routes en hubs. Over het algemeen leidt dit tot een efficiënter en duurzamer resultaat, hoewel het afhankelijk kan zijn van het aantal beschikbare hubs, voertuigen en spelers die bereid zijn samen te werken.

Daarnaast wordt in 7 van de 12 bronnen rekening gehouden met de dynamische aard van het PI. Dit houdt in dat het netwerk in realtime moet kunnen reageren op veranderingen in de vraag, onverwachte onbeschikbaarheid van routes, voertuigen en hubs als gevolg van externe omstandigheden zoals klimaat, schade en andere problemen. Verschillende papers vergelijken dynamische  $\Pi$ -modellen met meer traditionele modellen en concluderen over het algemeen dat dynamische modellen lagere transportkosten en ecologische voordelen opleveren, aangezien het transport van lege vrachtwagens in veel gevallen wordt geminimaliseerd. Ten slotte worden de kenmerken van multi-vehicle en digitalisatie minder vaak besproken, met beide vijf vermeldingen in de literatuur. Onder digitalisatie vallen vooral concrete toepassingen die andere kenmerken zoals de dynamische aard en interconnectiviteit zouden moeten ondersteunen. Hoewel er veel goede

voorbeelden worden gegeven, kan het nuttig zijn voor de praktische adoptie van het PI om in toekomstig onderzoek meer van deze concrete toepassingen te bespreken.

## 5. Discussie

Deze thesis is een systematische literatuurstudie waarin  $\Pi$ -literatuur wordt verzameld en geanalyseerd. Eerder werd geconcludeerd dat het grootste deel van de literatuur onderzoek doet op operationeel niveau. Dit is opvallend aangezien het logisch lijkt dat een innovatief concept als het PI eerst op strategische niveau grondig moet worden onderzocht, zodat er een duidelijke basis is voor operationeel onderzoek om specifiekere logistieke problemen op te lossen en modelleren. Er is dus een kans om toekomstig onderzoek meer op strategisch niveau te richten. De vraag kan gesteld worden waarom de operationele problemen dan toch veel frequenter worden besproken in de literatuur. Een reden kan zijn dat dit soort onderzoek simpelweg toegankelijker is aangezien er veel onderzoek beschikbaar is binnen huidige logistieke problemen op operationeel niveau, en deze problemen dus sneller kunnen worden aangepast naar het PI. Dit terwijl het strategisch niveau van het PI, waar voornamelijk de fysische netwerken worden ontworpen, nog eerder onduidelijk is. Een tweede reden voor deze verdeling in de literatuur kan zijn dat de methodologie van deze thesis zorgt voor een grotere opname van operationele literatuur tegenover strategische literatuur. De gebruikte kernwoorden in de zoekopdracht zoals; "model", "programming", en "decision support" kunnen mogelijk onbewust de nadruk hebben gelegd op onderzoek op operationeel niveau.

Een volgende conclusie was dat binnen het operationele niveau, de routeringsproblemen twee keer zoveel worden besproken als de operationele planning binnen de hubs. Het is geen verrassing dat het plannen van routes en voertuigen, en het coördineren van de verschillende spelers op deze routes in het PI van groot belang is. Deze modellen kunnen echter slechts praktisch toepasbaar zijn als ook de werking binnen de verschillende hubs in het netwerk is aangepast aan het PI. Daarom is er ook op dit vlak een kans voor toekomstig onderzoek om dit te garanderen.

De PI-kenmerken die het meest besproken worden en worden opgenomen in modellen doorheen alle planningsniveau's zijn de  $\Pi$ -infrastructuur, de interconnectiviteit, open hubs en het gebruik van een wereldwijd open supply hub. Deze kunnen echter slechts worden ondergebracht in drie van de 13 kenmerken die werden besproken in sectie 1. Andere kenmerken die minder aanbod komen in de literatuur zijn digitale connectiviteit, weerstand van het netwerk en multi-vehicle modellen. Er is dus ruimte in het PI-onderzoek om meer manieren te vinden om ook deze laatste drie kenmerken op te nemen in de modellen.

Als laatste zullen enkele beperkingen en kritische bedenkingen van deze thesis worden besproken. Eerst en vooral werden er bepaalde assumpties gemaakt bij het wel of niet accepteren van literatuur. Zo werden enkel artikels uit wetenschappelijke tijdschriften gebruikt, en bijvoorbeeld geen conference papers, reviews of hoofdstukken uit boeken. De reden hiervoor is natuurlijk om kwaliteit van onderzoek te garanderen, maar aangezien het PI een vrij recent concept is is het mogelijk dat

er interessante concepten/modellen niet zijn opgenomen in de studie. Ook werden er 44 bronnen uitgesloten omdat deze niet geranked waren volgens de JIF uit de Web of Science database, en omdat er vaak niet werd gefocused op het ondersteunen van beslissingen. Ook om deze redenen kunnen er eventueel bepaalde nuttige artikels zijn uitgesloten. Het is ook voorgekomen dat enkele bronnen door het selectieproces zijn geraakt en mee opgenomen zijn in de analyses, waaruit achteraf bleek dat deze niet strict voldoen aan de criteria, maar toch nuttig zijn gebleken. Dit roept de vraag op of er meerdere potentieel nuttige artikels mogelijk niet zijn opgenomen in het onderzoek.

Verder kan het nut van bepaalde gemaakte categorieën bij de analyse van de papers in twijfel worden getrokken, bijvoorbeeld de categorie prijsmechanismen gebaseerd op veilingen en het toewijzen van transportorders aan verladers aangezien beide categorieën slechts twee bronnen bevatten. Dit zijn natuurlijk niet voldoende bronnen om nuttige conclusies te kunnen maken voor deze probleemcategorieën. Deze categorieën zijn echter gemaakt aangezien de problemen in de literatuur sterk verschillen van de problemen in de andere categorieën. Achteraf gezien was het eventueel nuttig geweest om extra literatuur te verzamelen die deze categorieën konden aanvullen. Langs de andere kant kan dit ook een indicatie zijn van gebrek aan onderzoek in de literatuur over deze onderwerpen.

Tot slot is het ook nuttig te vermelden dat bij het analyseren van de n-kenmerken die worden opgenomen in de modellen er vooral gekeken werd naar gemeenschappelijke kenmerken die in verschillende papers aanbod kwamen. Achteraf werd dan gekeken naar hoe deze kenmerken aansloten bij het originele concept (en dus de 13 kenmerken) van (Montreuil, 2011; Montreuil et al., 2013). Het kan dus dat sommige kenmerken verschillen van die van Montreuil, aangezien het PI een recent concept is dat constant evolueert en door verschillende auteurs anders kan worden geïnterpreteerd. Deze thesis kan hopelijk toekomstige onderzoekers helpen om zich te oriënteren in dit onderwerp en een overzicht te krijgen van voorafgaand onderzoek.

# Referenties

- Ambra, T., Caris, A., & Macharis, C. (2021). Do You See What I See? A Simulation Analysis of Order Bundling within a Transparent User Network in Geographic Space. *Journal of Business Logistics*,
- Ancele, Y., Hà, M. H., Lersteau, C., Matellini, D. B., & Nguyen, T. T. (2021). Toward a more flexible VRP with pickup and delivery allowing consolidations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 128 C7 - 103077. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103077>
- Arnau, Q., Barrena, E., Panadero, J., de la Torre, R., & Juan, A. A. (2022). A biased-randomized discrete-event heuristic for coordinated multi-vehicle container transport across interconnected networks. *European Journal of Operational Research*, 302(1), 348-362. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.12.035>
- Bae, K. H., Mustafee, N., Lazarova-Molnar, S., & Zheng, L. (2022). Hybrid modeling of collaborative freight transportation planning using agent-based simulation, auction-based mechanisms, and optimization. *Simulation*, 98(9), 753-771. <https://doi.org/10.1177/00375497221075614>
- Behdani, B., Fan, Y., Wiegmanns, B., & Zuidwijk, R. (2014). Multimodal schedule design for synchromodal freight transport systems. *Behdani, B., Fan, Y., Wiegmanns, B., & Zuidwijk*, 424-444.
- Ben Mohamed, I., Klibi, W., Labarthe, O., Deschamps, J. C., & Babai, M. Z. (2017). Modelling and solution approaches for the interconnected city logistics. *International Journal of Production Research*, 55(9), 2664-2684. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1267412>
- Briand, M., Franklin, R., & Lafkihi, M. (2022). A dynamic routing protocol with payments for the Physical Internet: A simulation with learning agents. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 166 C7 - 102905. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102905>
- Chargui, T., Bekrar, A., Reghioui, M., & Trentesaux, D. (2020). Proposal of a multi-agent model for the sustainable truck scheduling and containers grouping problem in a Road-Rail physical internet hub. *International Journal of Production Research*, 58(18), 5477-5501. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1660825>
- Chargui, T., Ladier, A.-L., Bekrar, A., Pan, S., & Trentesaux, D. (2022). Towards designing and operating physical internet cross-docks: Problem specifications and research perspectives. *Omega*, 111, 102641.
- Delbart, T., Molenbruch, Y., Braekers, K., & Caris, A. (2021). Uncertainty in intermodal and synchromodal transport: Review and future research directions. *Sustainability*, 13(7), 3980.
- Dong, C., & Franklin, R. (2021). From the Digital Internet to the Physical Internet: A Conceptual Framework With a Stylized Network Model. *Journal of Business Logistics*,

- Durach, C. F., Kembro, J., & Wieland, A. (2017). A New Paradigm for Systematic Literature Reviews in Supply Chain Management. *Journal of Supply Chain Management*, 53(4), 67-85. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jscm.12145>
- Ghaderi, H., Zhang, L., Tsai, P. W., & Woo, J. (2022). Crowdsourced last-mile delivery with parcel lockers. *International Journal of Production Economics*, 251 C7 - 108549. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108549>
- Kong, X. T. R., Chen, J., Luo, H., & Huang, G. Q. (2016). Scheduling at an auction logistics centre with physical internet. *International Journal of Production Research*, 54(9), 2670-2690. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1117149>
- Krogsgaard, A., Pisinger, D., & Thorsen, J. (2018). A flow-first route-next heuristic for liner shipping network design. *Networks*, 72(3), 358-381. <https://doi.org/10.1002/net.21819>
- Kulkarni, O., Dahan, M., & Montreuil, B. (2022). Resilient Hyperconnected Parcel Delivery Network Design Under Disruption Risks. *International Journal of Production Economics*, 251 C7 - 108499. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108499>
- Li, M., Shao, S., Li, Y., Zhang, H., Zhang, N., & He, Y. (2022). A Physical Internet (PI) based inland container transportation problem with selective non-containerized shipping requests. *International Journal of Production Economics*, 245 C7 - 108403. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108403>
- Lin, M., Lin, S., Ma, L., & Zhang, L. (2022). The value of the Physical Internet on the meals-on-wheels delivery system. *International Journal of Production Economics*, 248 C7 - 108459. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108459>
- Lin, Y. H., Meller, R. D., Ellis, K. P., Thomas, L. M., & Lombardi, B. J. (2014). A decomposition-based approach for the selection of standardized modular containers. *International Journal of Production Research*, 52(15), 4660-4672. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.883468>
- Luo, H., Tian, S., & Kong, X. T. R. (2021). Physical Internet-enabled customised furniture delivery in the metropolitan areas: digitalisation, optimisation and case study. *International Journal of Production Research*, 59(7), 2193-2217. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1832271>
- Luo, H., Wang, Y., & Luo, Z. (2022). Physical internet enabled two-tier city logistics solution in the new retail era. *Industrial Management and Data Systems*, 122(6), 1453-1479. <https://doi.org/10.1108/IMDS-09-2021-0597>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., & Altman, D. G. (2009). Reprint-Preferred Reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *Physical Therapy*, 89(9), 873-880. <https://doi.org/10.1093/ptj/89.9.873>
- Montreuil, B. (2011). Toward a Physical Internet: meeting the global logistics sustainability grand challenge. *Logistics Research*, 3(2), 71-87.
- Montreuil, B., Meller, R. D., & Ballot, E. (2013). Physical internet foundations. In *Service orientation in holonic and multi agent manufacturing and robotics* (pp. 151-166). Springer.
- Puskás, E., Budai, Á., & Bohács, G. (2020). Optimization of a physical internet based supply chain using reinforcement learning. *European Transport Research Review*, 12(1 C7 - 47). <https://doi.org/10.1186/s12544-020-00437-3>

- Qiao, B., Pan, S., & Ballot, E. (2020). Revenue optimization for less-than-truckload carriers in the Physical Internet: dynamic pricing and request selection. *Computers and Industrial Engineering*, 139 C7 - 105563. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.12.010>
- Shi, Y., Chen, M., Qu, T., Liu, W., & Cai, Y. (2020). Digital connectivity in an innovative joint distribution system with real-time demand update. *Computers in Industry*, 123 C7 - 103275. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103275>
- Sternberg, H. S., & Denizel, M. (2021). Toward the Physical Internet—Logistics Service Modularity and Design Implications. *Journal of Business Logistics*,
- Walha, F., Bekrar, A., Chaabane, S., & Loukil, T. M. (2016). A rail-road PI-hub allocation problem: Active and reactive approaches. *Computers in Industry*, 81, 138-151. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.04.007>
- Yao, J. (2017). Optimisation of one-stop delivery scheduling in online shopping based on the physical Internet. *International Journal of Production Research*, 55(2), 358-376. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1176266>
- Zhang, J., Onal, S., & Das, S. (2020). The dynamic stocking location problem – Dispersing inventory in fulfillment warehouses with explosive storage. *International Journal of Production Economics*, 224 C7 - 107550. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107550>