



**UHASSELT**

KNOWLEDGE IN ACTION

## Faculteit Bedrijfseconomische Wetenschappen

master in de handelswetenschappen

### **Masterthesis**

#### ***Gerobotiseerde magazijnen: een literatuurstudie van planningsbeslissingen***

**Nina Engelen**  
**Pauline Hagelsteens**

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de handelswetenschappen, afstudeerrichting supply chain management

#### **PROMOTOR :**

dr. Antonius VAN GILS

#### **BEGELEIDER :**

De heer Ruben D'HAEN



**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

**2019**  
**2020**



# Faculteit Bedrijfseconomische Wetenschappen

master in de handelswetenschappen

## ***Masterthesis***

### ***Gerobotiseerde magazijnen: een literatuurstudie van planningsbeslissingen***

**Nina Engelen**

**Pauline Hagelsteens**

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de handelswetenschappen, afstudeerrichting supply chain management

#### **PROMOTOR :**

dr. Antonius VAN GILS

#### **BEGELEIDER :**

De heer Ruben D'HAEN



## **Pre-ambule**

Deze masterproef werd geschreven tijdens de COVID-19 crisis in 2020. Deze wereldwijde gezondheids crisis heeft mogelijk een impact gehad op het schrijf- en verwerkingsproces, de onderzoekshandelingen en de onderzoeksresultaten die aan de basis liggen van dit werkstuk.





## Woord vooraf

Deze masterproef vormt het sluitstuk van onze vierjarige opleiding Handelswetenschappen aan de Universiteit Hasselt. Beide hebben we gekozen voor de afstudeerrichting Supply Chain Management waarbinnen deze masterproef kadert. Gedurende negen maanden werd er voor deze masterproef literatuuronderzoek gedaan rond planningsbeslissingen in gerobotiseerde magazijnen om binnen de e-commerce omgeving zo snel mogelijk aan de vraag van klanten te voldoen. De keuze voor dit thema vloeit voort uit het feit dat we studenten zijn met als masterrichting Supply Chain Management en we geboeid zijn door het optimaliseren van magazijnoperaties. Uiteindelijk kozen wij beiden, Nina Engelen en Pauline Hagelsteens, voor dit onderwerp en werkten we samen aan deze duothesis. Twee semesters lang focusten we ons op het formuleren van een literatuuroverzicht van relaties tussen planningsbeslissingen in gerobotiseerde magazijnen.

Het maken van deze masterproef is niet altijd even makkelijk geweest en is zeker niet vlekkeloos verlopen. Toch was het schrijven van deze masterproef een zeer leerrijke ervaring en heeft het veel waardevolle elementen geleverd voor het verdere verloop van onze carrière. Door de grote autonomie die we kregen, is ons verantwoordelijkheidsgevoel absoluut verhoogd. Ook leerden we efficiënt omgaan met problemen en hoe ze doeltreffend op te lossen. Vooral leerden we doorzetten op momenten dat het minder ging.

Wij willen onze promotor Prof. Dr. Teun van Gils en co-promotor meneer D'Haen graag bedanken voor hun waardevolle input en steun bij dit onderzoek. Ze hebben ons altijd uitgebreide en kritische feedback gegeven waarmee we aan de slag konden om onze masterproef zo goed mogelijk te kunnen schrijven. Tenslotte willen we zeker ook nog onze familie en vrienden bedanken voor hun steun de afgelopen maanden.

Wij wensen u veel leesplezier!

Nina Engelen & Pauline Hagelsteens

14/05/2020



## Samenvatting

In deze masterproef worden planningsproblemen onderzocht van magazijnen die gebruik maken van de robotsystemen RMFS (Robotic Mobile Fulfillment System) en de AVS/RS (Autonomous Vehicle-based Storage and Retrieval System). Het onderzoek verdiept zich in de bestaande wetenschappelijke literatuur omtrent planningsbeslissingen. Ze zijn essentieel voor het goed functioneren van magazijnen die deze gerobotiseerde systemen gebruiken. Verder zal dit onderzoek nagaan welke relaties er bestaan tussen deze verschillende planningsbeslissingen, relaties die belangrijk zijn om beslissingen correct op elkaar te kunnen afstemmen. Bij het aantonen van het belang van deze relaties, kwamen ook potentiële relaties aan het licht tussen planningsbeslissingen. Het lijkt nuttig om die in de toekomst verder te onderzoeken.

De opkomst van de e-commerce heeft aangetoond dat consumenten enerzijds steeds meer bestellen en anderzijds ook telkens in kleinere hoeveelheden orders plaatsen. Magazijnen moeten zich aanpassen aan deze veranderende marktvraag. Deze evolutie in het bestelritme van de consumenten heeft e-commerce bedrijven aangezet om de overstap te maken van picker-to-parts systemen naar parts-to-picker systemen, waarbij de goederen naar de picker worden gebracht zodat het proces van orderpicking efficiënter kan verlopen. Manuele orderpicking neemt 55% van de magazijnkosten in bij het picker-to-parts systeem. Door deze hoge kostenpost moesten magazijnen de laatste jaren dan ook op zoek naar kostenverlagende en efficiëntieverhogende oplossingen zoals het RMFS-systeem of het AVS/RS-systeem.

Voor de juiste planningsbeslissingen was een correcte kennis van de systemen essentieel. Daarom worden die systemen dan ook uitgebreid toegelicht binnen de masterproef. Het RMFS-systeem maakt gebruik van robots die instaan voor het ophalen of terugbrengen van verplaatsbare rekken of pods naar de werkstations. Hier staan werknemers die de benodigde goederen of stock keeping units (SKU's), uit de pod halen en voldoen aan het order van de consument, waarna ze beginnen aan een volgende taak of terugkeren naar het magazijn. Een AVS/RS-systeem gebruikt ook robots, maar die worden hier shuttles genoemd. In de meest geïmplementeerde variant, het horizontaal AVS/RS-systeem bestaat het magazijn uit rekken met verschillende niveaus met aan weerszijden verschillende opslaglocaties. Tussen deze rekken bevinden zich shuttles die, als er een order geplaatst wordt, de eenheidslading picken binnen één niveau, waarna de shuttle zich beweegt naar het einde van het rek om de goederen met een liftsysteem verticaal te transporteren naar een werkstation.

De overschakeling van een manueel magazijn naar een gerobotiseerd systeem brengt niet enkel een kostenbesparing met zich mee, maar ook een heel aantal nieuwe planningsbeslissingen. De planningsbeslissingen voor een gerobotiseerd magazijn verschillen op strategisch, tactisch en operationeel niveau ten opzichte van manuele magazijnen. In deze masterproef zal er vooral gefocust worden op de planningsbeslissingen op operationeel niveau omdat deze korte-termijnbeslissingen van groot belang zijn voor de dagelijkse prestaties van het magazijn, zoals de doorvoercapaciteit die zo hoog mogelijk moet zijn of de reistijden voor ophaal- en opslagtransacties die tot een minimum moeten beperkt worden. De strategische en tactische beslissingen hebben uiteraard ook een grote invloed op de performantie van het magazijn, maar

omdat deze vastliggen op middellange en lange termijn, kan er minder flexibel mee omgegaan worden in de dagdagelijkse operaties.

Er zijn heel wat operationele planningsbeslissingen van een RMFS-systeem die gelijklopen met die in een AVS/RS-systeem. Zo moeten in beide systemen opslag- en ophaaltransacties op een bepaalde manier toegewezen worden aan de shuttles/robots. Welke shuttle/robot voert welke transactie uit? Deze beslissing is van groot belang op de performantie van het systeem, voornamelijk op vlak van de reistijden. Verder is het opslagbeleid of de plaats voor de SKU's binnen het magazijn één van de operationele belangrijke beslissingen zowel in het RMFS-systeem als in het AVS/RS-systeem. In een RMFS-systeem houdt deze beslissing twee keuzes in, namelijk: op welke pod worden welke SKU's gestockeerd en waar worden deze pods gestockeerd in het magazijn. In het AVS/RS-systeem kunnen de SKU's willekeurig, specifiek of klasse-gebaseerd gestockeerd worden.

Om het operationeel beleid van de gerobotiseerde magazijnen te verbeteren, is het niet alleen handig alle planningsbeslissingen te kennen, maar ook verbanden tussen deze beslissingen te begrijpen. De keuze voor een bepaalde optie bij het maken van een planningsbeslissing heeft namelijk niet alleen zijn invloed op de performantie van het magazijn, maar kan ook andere planningsbeslissingen beïnvloeden. Vandaar dat relaties tussen deze beslissingen onderzocht werden.

Algemeen kan geconcludeerd worden dat er zowel voor het RMFS-systeem als voor het AVS/RS-systeem nog maar weinig relaties onderzocht werden tussen de verschillende operationele planningsbeslissingen. De meeste operationele beslissingen van een AVS/RS-systeem worden in de literatuur geanalyseerd en gecombineerd met tactische of strategische beslissingen, zoals de diepte/breedte-verhouding van de rekken. Het RMFS-systeem heeft nood aan een grotere beschikbare oppervlakte in tegenstelling tot het AVS/RS-systeem. Het AVS/RS-systeem wordt in de hoogte gebouwd en heeft daarom minder oppervlakte nodig om hetzelfde volume aan SKU's te kunnen stockeren. Een magazijn met een AVS/RS-systeem is wel gevoeliger op het vlak van lay-out dan een RMFS-systeem. Zo is de rekstructuur hier statisch en dus vast op lange termijn. De strategische en tactische beslissingen zijn van groot belang en hebben een grote invloed op de performantie van het magazijn. Vandaar dat operationele beslissingen in de AVS/RS-systemen vaak gecombineerd worden met hun strategische en tactische varianten. Dit is niet zo voor de onderzochte operationele planningsbeslissingen in een RMFS-systeem. Deze werden vooral als individuele beslissingen bekeken, zonder enige andere beslissing hiermee te combineren.

Verder lijkt het nuttig om ook de verticale variant van het AVS/RS-systeem verder te onderzoeken, aangezien deze op verschillende vlakken voordelen biedt ten opzichte van de horizontale variant. Een andere conclusie voortkomend uit deze masterproef is dat heel wat planningsbeslissingen zowel voor het RMFS-systeem als AVS/RS-systeem gelden. Vaak worden deze planningsbeslissingen onder een andere naam genoemd, maar is de invulling gelijklopend voor beide systemen.

# Inhoudsopgave

<b>Pre-ambule</b>	<b>1</b>
<b>Woord vooraf</b>	<b>3</b>
<b>Samenvatting</b>	<b>5</b>
<b>Inhoudsopgave</b>	<b>7</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>9</b>
1.1 <i>Probleemstelling</i>	9
1.2 <i>Onderzoeksvraag</i>	14
1.3 <i>Onderzoeksmethodologie</i>	15
<b>2 Planningsbeslissingen in magazijnen met een RMFS-systeem</b>	<b>17</b>
2.1 <i>Werking van het RMFS-systeem en waarom het succesvol is</i>	17
2.1.1 <i>Werking van het RMFS-systeem</i>	18
2.1.2 <i>Prestatie van het RMFS-systeem in vergelijking met andere picksystemen</i>	20
2.1.3 <i>Voordelen van het RMFS-systeem in vergelijking met andere pick systemen</i>	23
2.2 <i>Welke planningsbeslissingen komen voor in de academische literatuur</i>	24
2.2.1 <i>Toewijzing van de orders als operationele planningsbeslissing</i>	26
2.2.2 <i>Taakcreatie in het RMFS-systeem als operationele beslissing</i>	27
2.2.3 <i>Planning van de paden binnen het RMFS-systeem</i>	29
2.3 <i>Relaties tussen verschillende planningsbeslissingen in het RFMS-systeem</i>	34
<b>3 Planningsbeslissingen in magazijnen met een AVS/RS-systeem</b>	<b>37</b>
3.1 <i>De werking en het succes van AVS/RS-systemen</i>	37
3.1.1 <i>Van AS/RS naar AVS/RS</i>	37
3.1.2 <i>Verschillende soorten AVS/RS-systemen</i>	38
3.1.3 <i>Werking AVS/RS-systeem</i>	41
3.1.4 <i>Verschillen horizontale en verticale AVS/RS-systemen</i>	44
3.2 <i>Planningsbeslissingen in AVS/RS-magazijnen</i>	45
3.2.1 <i>Keuze van de rustplaats van de shuttle</i>	46
3.2.2 <i>Regels voor shuttletoewijzing aan transacties</i>	47
3.2.3 <i>Shuttles toewijzen aan zones</i>	48
3.2.4 <i>Planningsregel van de transacties</i>	50
3.2.5 <i>Verwerking van de transacties</i>	51
3.2.6 <i>Opslagbeleid</i>	52
3.2.7 <i>Type commando cycli</i>	53
3.2.8 <i>Blokkeringsbeleid</i>	53
3.2.9 <i>Operationele planningsbeslissingen in verticale AVS/RS-systemen</i>	55
3.3 <i>Relaties tussen verschillende planningsbeslissingen in een AVS/RS-systeem</i>	56
<b>4 Conclusie</b>	<b>61</b>
<b>5 Aanbevelingen</b>	<b>63</b>
5.1 <i>Aanbevelingen voor toekomstig onderzoek naar het RMFS-systeem</i>	63
5.2 <i>Aanbevelingen voor toekomstig onderzoek naar het AVS/RS-systeem</i>	63
<b>6 Referenties</b>	<b>65</b>
<b>7 Appendix</b>	<b>69</b>
7.1 <i>Appendix A: classificatietabel van de gehanteerde literatuur (RMFS-systeem)</i>	69
7.2 <i>Appendix B: classificatietabel van de gehanteerde literatuur (AVS/RS-systeem)</i>	70



# 1 Inleiding

Deze thesis bespreekt planningsbeslissingen in gerobotiseerde magazijnen. Maar waarom is dat van belang? Wat zijn planningsbeslissingen? En welk soort gerobotiseerde magazijnen worden gehanteerd? Dat wordt beschreven in Sectie 1.1. In Sectie 1.2 worden de onderzoeksvraag en enkele deelvragen aangehaald en in Sectie 1.3 wordt omschreven hoe dit onderzoek aangepakt werd.

## 1.1 Probleemstelling

De laatste jaren nemen e-commerce verkopen exponentieel toe. Steeds meer klanten kopen online en verwachten hun bestelling dan ook zo snel mogelijk in huis of zoals de alom bekende slogan "Voor 23:59 uur besteld, morgen in huis" vaak belooft. Online retailers dienen deze belofte na te komen en verschillende processen aan te passen om dit mogelijk te maken. Zo moeten online retailers hun magazijn- en leveringsactiviteiten updaten om te voldoen aan de groeiende vraag en verwachtingen van de klant en om een snelle en efficiënte service te faciliteren (Bogue, 2016). Ze schakelen dan over van picker-to-parts systemen naar parts-to-picker systemen. Dit kan door gebruik te maken van robotsystemen die snel orders kunnen picken. Een voorbeeld van een gerobotiseerd systeem is het Robotic Mobile Fulfillment System (RMFS-systeem) dat vandaag de dag grotendeels door internet retailers in hun magazijnen wordt toegepast omdat zij vaak te maken krijgen met significante onzekerheid omtrent de groeiratio's van hun verkopen. Hierdoor zoeken zij naar oplossingen die schaalbaar en flexibel zijn (Wulfraat, 2012).

Magazijnen zijn een essentieel component van de supply chain van organisaties en zijn verantwoordelijk voor het bufferen van de materiaalstroom langs de toeleveringsketen. Deze buffer zal dienen om de variabiliteit die wordt veroorzaakt door factoren als seizoensgebondenheid en/of batching in productie en transport op te vangen. Vervolgens zorgen magazijnen voor waardetoevoeging door orders van verschillende leveranciers te consolideren en gezamenlijk aan klanten te leveren. Verder voegen magazijnen ook waarde toe aan de producten zoals verpakken, prijsstelling, etikettering, en productaanpassing. Om al deze extra waarde mogelijk te maken, zullen verschillende correcte beslissingen moeten genomen worden. Volgens Gu et al. (2007) bestaan er twee grote groepen van beslissingen: magazijninrichting en magazijnactiviteiten. Onder magazijninrichting wordt verstaan de algemene structuur van het magazijn, grootte en dimensies, indeling van de verschillende afdelingen, materiaalkeuze en de strategie. Deze beslissingen hebben een lange termijnimpact en kunnen moeilijk worden aangepast op korte termijn. De magazijnactiviteiten omvatten het ontvangen en verzenden van goederen, opslag van goederen en het picken en shippen van orders (Gu et al., 2007). Tot op heden zijn deze activiteiten een zeer arbeidsintensief proces, wat snel kan leiden tot hoge kosten en een onbevredigde klantvraag bij ondermaatse prestaties (Van Gils et al., 2018).

Manuele magazijnactiviteiten hebben niet alleen economische nadelen. Ze vereisen ook een grote ruimte, hoewel de beschikbare grond gelegen dichtbij vraagpunten schaars is. Bovendien heeft het manuele orderpicking proces vaak te lijden onder een slechte ergonomie en vereist het kwalitatieve arbeidskrachten die bereid zijn om in ploegendienst te werken, maar die zijn schaars. Door de opkomst van de e-commerce moeten bedrijven bovendien miljoenen unieke artikelen op



een dag verwerken in grote en variabele volumes (Azadeh et al., 2017). Om die redenen worden magazijnmanagers gedwongen naar nieuwe oplossingen te zoeken. Nieuwe marktontwikkelingen zoals robots, maken het mogelijk om dit groot aantal orders in een korte tijd af te handelen (Van Gils et al., 2017). Naast robots is er de laatste jaren een sterke interesse voor het gebruik van drones. Ook binnen het RMFS-systeem werd hierover al nagedacht door Ham (2020).

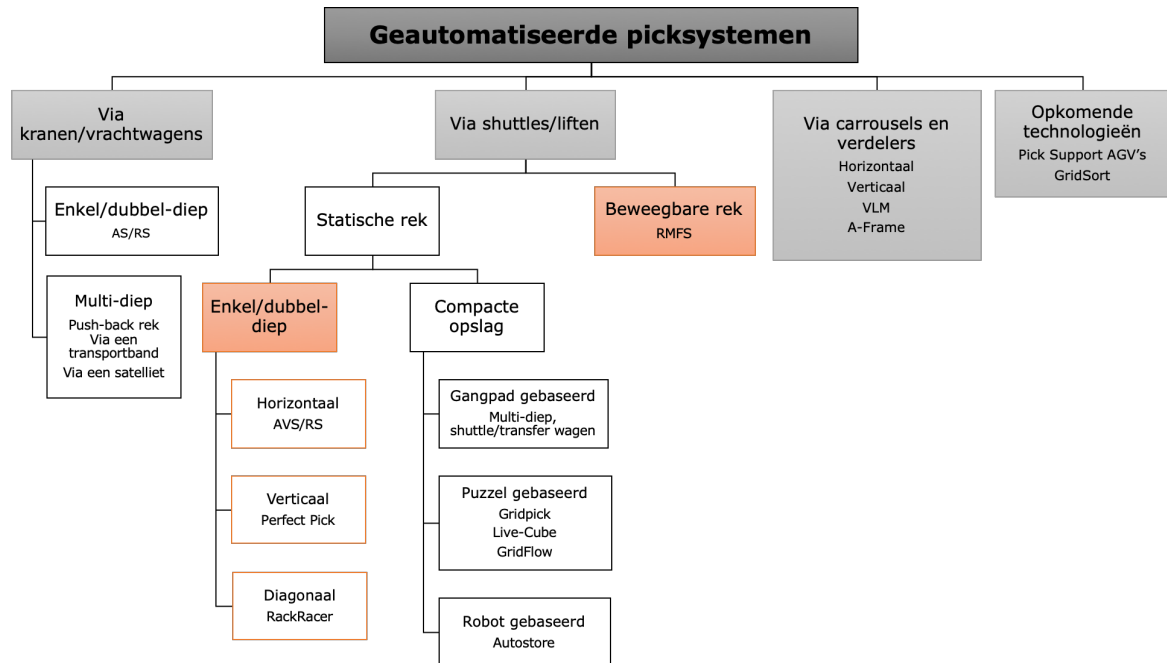
Robotisering heeft al aan belang gewonnen in verschillende segmenten van de maatschappij. Tegenwoordig zijn robots in steeds meer huishoudens onmisbaar. Ook productiebedrijven zetten actief in op het ingebruiknemen van robots (Pieri, 2016). Gerobotiseerde handelingssystemen worden reeds in toenemende mate toegepast in magazijnen omdat ze weinig ruimte in beslag nemen, flexibiliteit bieden, proceskosten reduceren en 24/7 kunnen werken. Dit maakt gerobotiseerde handelingssystemen bijzonder geschikt voor de e-commerce activiteiten (Azadeh et al., 2017). Volgens een rapport van Frost & Sullivan, opgesteld in samenwerking met GITEX Technology, geeft deze enorme groei niet alleen het belang van robotisering in de toekomst weer, maar zal de wereldwijde productiviteit en veiligheid op de werkplek hierdoor enorm stijgen. De logistieke sector zal naar verwachting de snelste groei kennen binnen de robotisering, omwille van die explosieve toename van de e-commerce (Pieri, 2016).

Robots hebben niet alleen in magazijnen een positieve invloed op de productiviteit en efficiëntie, maar ze bieden magazijnmanagers ook andere positieve resultaten. Robots helpen voldoen aan de toenemende vraag- en productie-eisen en ze dienen ook een tweede doel, namelijk het aantal letsels op de werkplek als gevolg van tillen, vallen en andere gevaren verminderen. Door gebruik te maken van robots in het magazijn kunnen werknemers op een vaste werkplek blijven. Hierdoor verhoogt de efficiëntie en de veiligheid van de werknemers. Ook hebben robots een positief effect op de arbeidsvermoeidheid van werknemers (Matthews, 2019).

Binnen de detailhandel is de e-commerce het snelst groeiende segment. In 2012 werd zelfs voor het eerst de kaap van een biljoen dollar bereikt. Magazijnactiviteiten in e-commerce bestaan hoofdzakelijk uit piece-picking operations, waarbij orderpickers alle orders individueel picken, omdat klanten een snelle afhandeling van hun vraag verwachten. Dit is een goede methode voor slechts één order, maar als er meerdere orders tegelijk gepickt moeten worden, blijkt piece-picking minder efficiënt dan batching. Hierbij pickt de orderpicker verschillende orders op één route, brengt ze samen terug naar het depot, waardoor de tijd die nodig is voor het picken van één pickorder zal dalen. Om aan deze e-commerce veranderingen het hoofd te bieden, worden online retailers gedwongen hun magazijnen constant te updaten. Tot op heden was het ophalen van goederen door manuele pickers een zeer kostelijk deel van het proces binnen de detailhandel. Dit geeft ook het German Centre For Digital Technology aan, die stelt dat 55% van de magazijnkosten toe te wijzen zijn aan het manueel picken van de orders (Bogue, 2016). Alhoewel deze magazijnactiviteiten onvermijdelijk zijn voor de stroom van goederen, wordt het over het algemeen beschouwd als een kostencentrum omdat er geen extra waarde aan het product wordt toegevoegd en klanten ook niet bereid zijn om hiervoor extra te betalen. Elke vorm van optimalisatie op het vlak van het verlagen van de operationele kosten is dan ook wenselijk (Wurman et al., 2008). Innovaties die enerzijds een verlaging van deze kosten mogelijk maken

en anderzijds zorgen voor een verhoging van de efficiëntie zullen dan ook voordelen opleveren voor elke organisatie (Bogue, 2016).

De exponentiële groei van de e-commerce houdt ook in dat automatisering van het picking proces sterk is toegenomen. Hierdoor is robotisering in de laatste jaren een vitale rol binnen de magazijnen gaan spelen.



Figuur 1: Classificatie van automatische orderpicksystemen (Azadeh et al., 2017)

Figuur 1 laat de verschillende automatische picksystemen zien. In deze masterproef zal er gefocust worden op twee verschillende systemen, namelijk de *Autonomous Vehicle-based Storage and Retrieval Systems*, AVS/RS-systemen en het *Robotic Mobile Fulfillment System*, RMFS-systeem. Het AVS/RS-systeem werd gekozen omdat er reeds veel onderzoek naar gebeurde én hedendaagse magazijnen het steeds meer gebruiken. Het RMFS-systeem werd gekozen omdat Amazon Robots één van de pioniers is in het gebruik van robots in hun e-commerce magazijnen. Amazon Robotics is een voortvloeisel uit het bedrijf Kiva Systems dat in 2011 de eerste 1.300 robots leverde aan Amazon. In 2012 werd Kiva Systems overgenomen door Amazon, dat hierna verder produceerde onder de naam Amazon Robotics (Bogue, 2016). Kiva Systems is een voorbeeld van een RMFS-systeem waarbij robots instaan voor de order picking in plaats van manuele pickers.

De kracht van het RMFS-systeem is het feit dat het elke werknemer in het magazijn willekeurig toegang geeft tot de voorraad in het magazijn, doordat zij eender welke robot binnen het magazijn kunnen aanspreken (Wurman et al., 2008). Hiermee wordt bedoeld dat eender welke werknemer een stock keeping unit (SKU) kan opvragen eender waar in het magazijn, hoe ver deze werknemers ook van de SKU af zit. SKU's worden toegekend aan verschillende producten die elk hun eigen kenmerken hebben. Het RMFS-systeem laat toe dat voorraad parallel verzameld kan worden. Door deze parallelle verzameling zullen minder personeelsleden nodig zijn binnen het magazijn, wat kostenvoordelen oplevert. Het RMFS-systeem bestaat uit rijdende robots uitgerust

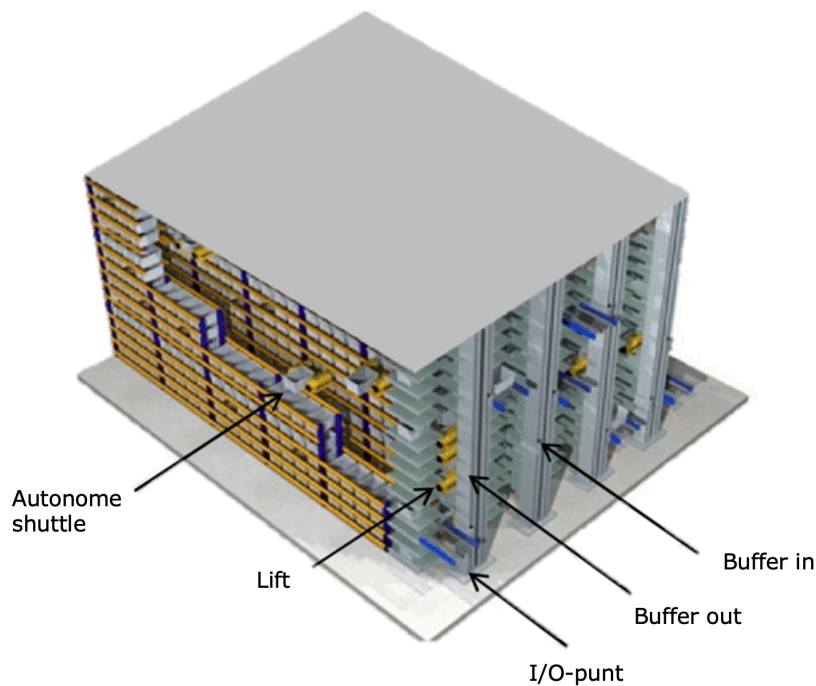
met een liftsysteem. Deze robots worden geïllustreerd in Figuur 2. De robots zijn klein genoeg om onder de voorraad pods te rijden en zo de pods van de grond te liften. Ze hebben een liftcapaciteit van meer dan 1000 kilogram waardoor ze zonder problemen een rek van mensgrootte kunnen tillen (Boysen et al, 2017). Een robot verplaatst de rekken met goederen van een opslaglocatie naar een locatie waar de bestelde artikelen handmatig gepickt worden door een werknemer. Hierna worden de rekken getourneerd naar de opslaglocatie. De robots kunnen meer continu en efficiënter werken dan hun menselijke tegenhangers en leveren hierdoor tijdswinst en lagere kosten op dan manuele pickers (D'Andrea, 2012).



*Figuur 2: Amazon Robots in actie*

RMFS-systemen hebben bewezen verschillende voordelen op te leveren. Ten eerste zorgt dit systeem voor een kortere productlevering omdat bedrijven die gebruik maken van RMFS-systemen in staat zijn goederen sneller te verzamelen in het magazijn. Ten tweede neemt de efficiëntie van het picking proces toe. Robots zijn drie keer zo snel in het verzamelen van goederen vergeleken met manuele pickers. Hierdoor kan een aanzienlijk hoger aantal goederen verzameld worden in kortere tijd, wat financiële voordelen oplevert voor bedrijven zoals Amazon. Door het RMFS-systeem zal het aantal werknemers op de werkvloer verminderen. Verscheidene analisten beweren dat werknemers hierdoor steeds minder kansen op de werkvloer zullen krijgen. Michael Patcher, een analist bij Wedbush Securities, beschreef dat door de afhankelijkheid van robots "gewone werknemers hun job zouden verliezen en steeds minder opportuniteiten krijgen". De Senior Vice President van Amazon sprak deze bewering tegen door te verzekeren dat werknemers niet negatief beïnvloed zullen worden door RMFS-systemen (Dhiraj & Sharma, 2017).

Door de jaren heen zijn verschillende robots ontwikkeld en huidige modellen verbeterd. Het RMFS-systeem is daar slechts één van. Een ander robotsysteem dat onderzocht wordt in deze masterproef is het AVS/RS-systeem. Het AVS/RS-systeem is een verbeterde versie van zijn voorganger het Automated Storage and Retrieval Systems (AS/RS-systeem). Het probleem bij het AS/RS-systeem was onvoldoende flexibiliteit om aan de vraag te voldoen en de beperkte doorvoercapaciteit. Dit laatste verhogen bracht echter grote kosten mee. Een nieuwe generatie automatische orderverzamelsystemen, *Autonomous Vehicle-based Storage and Retrieval Systems (AVS/RS-systemen)* (Azadeh et al., 2017) loste het grote kostenprobleem op. Het AVS/RS-systeem verbetert zijn voorganger AS/RS-systeem vooral op vlak van kosten, flexibiliteit en de modularisering en wordt steeds populairder omdat de vereiste investering vergelijkbaar is met die van AS/RS-systemen, terwijl de capaciteit flexibeler en aanzienlijk hoger is (Ekren & Heragu, 2011).



*Figuur 3: Een typisch tier-captive AVS/RS-systeem*

Figuur 3 toont aan dat de AVS/RS-systemen gebruik maken van autonome shuttles, die in de x-richting en de y-richting kunnen rijden op elk niveau in het gangpad, en liften verplaatsen de shuttles of de ladingen tussen de niveaus. In deze variant kunnen shuttles alleen horizontaal bewegen en vertrouwen op liften voor verticale bewegingen. De laatste tijd zijn er verschillende andere robotsystemen ontstaan, waarbij de shuttles de mogelijkheid hebben zich niet alleen horizontaal te bewegen, maar ook tot verschillende niveaus te heffen door diagonaal of verticaal te bewegen (Azadeh et al., 2016). Daarom kan het AVS/RS-systeem op basis van de bewegingsmogelijkheden van de shuttles in drie categorieën worden ingedeeld: horizontale, verticale en diagonale systemen. De capaciteit van dit systeem is zeer flexibel: gemakkelijk te verhogen door extra shuttles in te zetten of verlagen door shuttles te onttrekken (Azadeh et al., 2017).

Net zoals bij manuele pickingsystemen moeten de gerobotiseerde systemen ook planningsbeslissingen nemen, bijvoorbeeld: welke robot doet welke orderlijn? Of hoe robots routeren door het magazijn? Of waar rust een robot als hij geen opslag- of ophaaltransactie aan het uitvoeren is? Binnen deze masterproef worden de planningsbeslissingen voor het RMFS-systeem en AVS/RS-systeem besproken. Planningsbeslissingen omvatten alle beslissingen die genomen zullen moeten worden in magazijnen met gerobotiseerde systemen. Beslissingen worden genomen op strategisch, tactisch en operationeel niveau. Het onderscheid zit vooral in het tijdsverloop waar ze invloed op hebben. Zo zullen de strategische beslissingen invloed hebben op de lange termijnwerking van het magazijn terwijl de operationele beslissingen elke dag herzien en veranderd zullen worden. In deze masterproef worden deze verschillende planningsbeslissingen in beide systemen onderzocht.

## 1.2 Onderzoeksvraag

*"Gerobotiseerde magazijnen: een literatuurstudie van planningsbeslissingen"*

In deze masterproef wordt nagegaan welke planningsbeslissingen voorkomen in gerobotiseerde magazijnen en hoe deze zich vertalen in twee specifieke gerobotiseerde magazijnen: het RMFS-systeem en AVS/RS-systeem. Om een antwoord op deze onderzoeksvraag te bieden, worden de volgende deelvragen gesteld:

### 1.2.1 Welke planningsbeslissingen komen voor in magazijnen die gebruik maken van een RMFS-systeem?

*Wat houdt het RMFS-systeem in en waarom is het succesvol?*

In dit gedeelte zal beschreven worden hoe het RMFS-systeem is opgebouwd en functioneert. Verder zal hier uitgelegd worden waarom dit systeem een succes kan zijn voor magazijnen en welke voordelen verbonden zijn aan het gebruik ervan.

*Welke planningsbeslissingen komen voor in de academische literatuur?*

Hier wordt onderzocht welke planningsbeslissingen kenmerkend zijn in een magazijn dat gebruik maakt van het RMFS-systeem en hoe deze het best gemaakt kunnen worden. De planningsbeslissingen die besproken worden, leggen de focus op het operationele gebeuren.

*Hoe kunnen planningsbeslissingen in het RMFS-systeem gecombineerd worden?*

In dit gedeelte worden de planningsbeslissingen van de vorige deelvraag gecombineerd. Binnen het RMFS-systeem zijn er verschillende planningsbeslissingen die verband houden met elkaar. Door dit verband is het essentieel om de beslissingen op elkaar af te stemmen.

### 1.2.2 Welke planningsbeslissingen komen voor in magazijnen die gebruik maken van een AVS/RS-systeem?

*Wat zijn AVS/RS-systemen en waarom zijn ze succesvol?*

AVS/RS-systemen of *Autonomous Vehicle-based Storage and Retrieval Systems*, maken gebruik van shuttles, die eenheidsladingen verplaatsen in de horizontale richting en deze dan bewegen naar liften, die voor verticaal transport tussen de verschillende niveaus zorgen. In dit gedeelte worden deze systemen verder uitgelegd en geanalyseerd.

*Welke planningsbeslissingen komen voor in de academische literatuur?*

Bij AVS/RS-systemen komen verschillende planningsproblemen, ook wel planningsbeslissingen genoemd, aan het licht. Deze worden onderzocht in deze deelvraag. Ook hier wordt de focus gelegd op de dagdagelijkse beslissingen, de zogezegde operationele planningsbeslissingen.

*Hoe kunnen planningsbeslissingen in AVS/RS-systemen gecombineerd worden?*

In dit gedeelte worden de planningsbeslissingen van de vorige deelvraag gecombineerd. Als men kiest voor het een bepaald rustpuntbeleid, moet met andere beslissingen (in combinatie) rekening worden gehouden voor een optimaal resultaat voor de performantie van het magazijn.

### 1.3 Onderzoeksmethodologie

Bovenstaande onderzoeksvragen zullen door middel van een literatuurstudie en classificatie van de literatuur onderzocht worden, met het doel managers te ondersteunen bij het verder optimaliseren van gerobotiseerde magazijnen. Een literatuuronderzoek was in dit geval de meest geschikte manier om meer kennis te verwerven en een beter inzicht te krijgen in de verschillende materie die belangrijk en relevant is voor het onderzoek. In deze masterproef wordt de meest relevante wetenschappelijke literatuur onderzocht om zo een antwoord te bieden op de onderzoeksvraag.

Ook de deelvragen worden onderzocht aan de hand van wetenschappelijke literatuur. De eerste deelvraag beschrijft hoe de twee robotsystemen zijn opgebouwd en functioneren (Sectie 2.1 en Sectie 3.1). De tweede deelvraag brengt hun unieke planningsbeslissingen in kaart en analyseert ze (Sectie 2.2 en Sectie 3.2). In de derde deelvraag wordt de onderzochte literatuur geclassificeerd en worden relaties tussen planningsbeslissingen aan het licht gebracht (Sectie 2.3 en Sectie 3.3).

De informatie essentieel voor het onderzoek werd via het internet verzameld. Voor het raadplegen van de wetenschappelijke artikelen wordt voornamelijk gebruik gemaakt van de database Google Scholar en de bibliotheek van de Universiteit Hasselt. Om de verschillende deelvragen te beantwoorden, worden zoektermen als robots warehouses, e-commerce warehouse, robotics warehousing, amazon robotics, Kiva Systems, planning problems, Amazon Robotics, decision making in warehouses, AVS/RS, RMFS, operational decisions... geraadpleegd. Ook wordt in het onderzoek *Robotized Warehouse Systems: Developments and Research Opportunities* (Azadeh et al., 2017) een overzicht gegeven van de verschillende robotsystemen in magazijnen én hun planningsbeslissingen, zowel strategisch, tactisch als operationeel. In deze masterproef worden vooral de operationele beslissingen uitvoerig onderzocht.

De laatste deelvraag bestudeert het combineren van planningsbeslissingen binnen de verschillende robotsystemen. Onder de laatste deelvraag zal er een tabel worden opgesteld die weergeeft welke relaties er tussen deze planningsbeslissingen besproken worden in de literatuur. Zo wordt er een duidelijk beeld geschetst welke planningsbeslissingen samenhangen. Verder bevindt zich in de appendix van deze masterproef een classificatietabel met wetenschappelijke papers over operationele planningsbeslissingen. In deze tabel worden ook papers opgenomen met (1) twee of meerdere planningsbeslissingen en (2) waarvan minstens één planningsbeslissing operationeel van aard is. Hoewel dit onderzoek enkel dieper ingaat op operationele planningsbeslissingen, worden ook wetenschappelijke papers die focussen op bijvoorbeeld één operationele beslissing en andere niet-operationele beslissingen (strategisch of tactisch van aard) opgenomen in deze classificatietabel. Wetenschappelijke papers over operationele planningsbeslissingen in het AVS/RS-systeem worden immers vaak gecombineerd met deze tactische en strategische varianten.



## **2 Planningsbeslissingen in magazijnen met een RMFS-systeem**

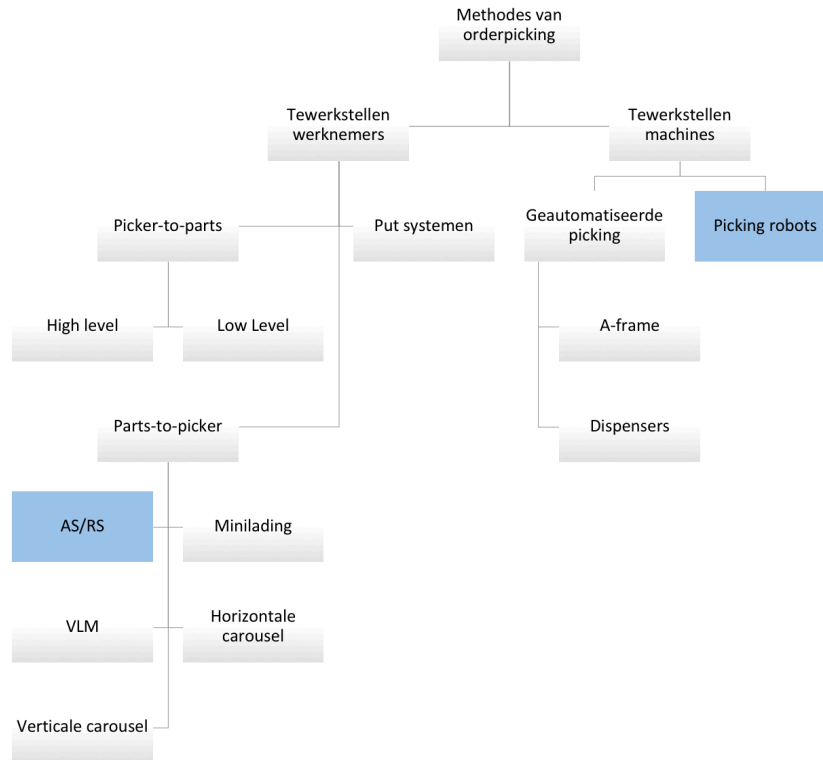
Sectie 2.1.1 geeft een beschrijving van het RMFS-systeem en de werking ervan. De voor- en eventuele nadelen worden besproken evenals de opbouw en werking ervan. Sectie 2.1.2 bespreekt de planningsbeslissingen in magazijnen die werken met een RMFS-systeem en gaat na waar deze verschillen van een manueel magazijn. Ten slotte zal in Sectie 2.1.3 bekeken worden welke relaties er bestaan tussen de verschillende planningsproblemen en welke wetenschappelijke literatuur deze relaties reeds onderzocht heeft.

### **2.1 Werking van het RMFS-systeem en waarom het succesvol is**

De opkomst van e-commerce zorgt ervoor dat er veel kleine orders aan een hoog tempo besteld worden. Hierdoor is e-commerce er zich van bewust dat de nood aan nieuwe magazijnsystemen zich opdringt (Merschformann et al., 2018). Het meest voor de hand liggende systeem, het manuele picker-to-parts systeem, heeft dan ook plaats gemaakt voor een heel aantal gerobotiseerde en geautomatiseerde systemen. Binnen de picker-to-parts systemen verplaatst de picker zich doorheen de gangen van het magazijn om zo items te verzamelen voor een bepaalde order (De Koster, 2004). De verschuiving naar de gerobotiseerde en geautomatiseerde systemen wordt veroorzaakt doordat de traditionele picker-to-parts systemen goed werken voor grote orders, maar minder tot niet efficiënt zijn voor kleine orders (Merschformann et al., 2018). Grote orders bestaan uit een groot aantal SKU's waardoor consolidatie een noodzaak is. In de e-commerce bestaan orders meestal uit een beperkter aantal SKU's. E-commerce bedrijven willen een groot assortiment aan de eindklant aanbieden en daardoor liggen in hun magazijnen over het algemeen een groot aantal artikelen opgeslagen (Merschformann et al., 2018). In deze veelal grote magazijnen is de wandelafstand voor een manuele picker langer. Geautomatiseerde parts-to-picker systemen bieden hier een voordeel doordat zij de tijd die pickers spenderen aan het verzamelen en zoeken van de goederen elimineren en dit omdat de pickers in een geautomatiseerd systeem aan een werkstation staan en de SKU's ontvangen van robots (Merschformann et al., 2018).

De parts-to-picker systemen maken gebruik van geautomatiseerde opslag- en ophaalsystemen zoals Automated vehicle Storage en Retrieval Systems (AVS/RS) of het Robotic Mobile Fulfillment System (RMFS-systeem). Binnen deze systemen worden de benodigde SKU's om aan een order te voldoen naar de pickers gebracht die aan een werkstation staan. Figuur 4 geeft een overzicht van de methodes van orderpicking zoals beschreven in De Koster (2004) met markeringen van de focus van deze masterproef. Een voorbeeld van een geautomatiseerd parts-to-picker systeem is het *Robotic Mobile Fulfillment Systems* (RMFS). Deze sectie van de literatuurstudie zal zich toeleggen op de werking van het RMFS-systeem.





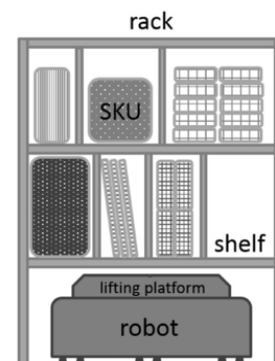
Figuur 4: Een overzicht van de methodes van orderpicking

### 2.1.1 Werking van het RMFS-systeem

Eerst zal de werking van de RMFS-systemen besproken worden om zo de beslissingsproblemen beter te kunnen begrijpen. Een RMFS-systeem bestaat uit drie verschillende onderdelen: (1) rekken waarin de producten worden opgeslagen (pods genoemd) (Figuur 6), (2) robots die onder deze rekken kunnen schuiven en deze verplaatsen doorheen het magazijn (Figuur 5) en (3) werkstations bemand door werknemers. Deze drie delen van het RMFS-systeem werken samen om aan de orders van klanten te voldoen.

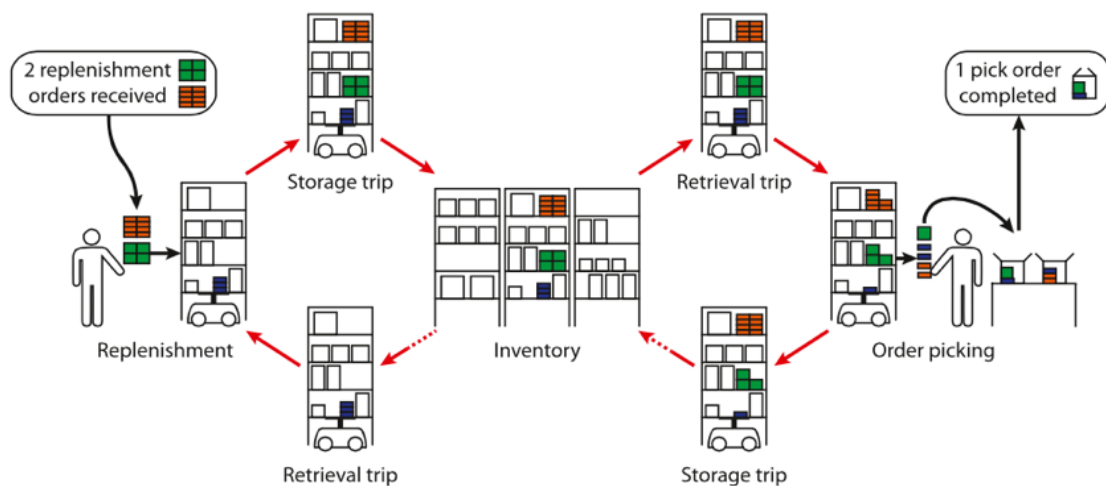


Figuur 5: Kiva Systems robot



Figuur 6: Pod met SKU's gedragen door een robot

Binnen het RMFS-systeem voorzien robots de pickers van goederen. De robots transporteren de verplaatsbare rekken, pods, vanuit de voorraad doorheen het magazijn en brengen ze naar de werkstations. Daar staan de pickers die de gebrachte goederen zullen sorteren en verpakken tot individuele orders. Het proces waarin de pods met goederen door de robots naar de werkstations worden gebracht is een deel van het orderpickingproces. Het proces van de orderpicking is rechts op Figuur 7 te zien. Links op de Figuur is te zien hoe het aanvulstation (replenishment station) aan de aanvulorders zal voldoen. Aanvulorders zorgen ervoor dat de goederen beschikbaar zijn op de pods. In het voorbeeld van de figuur zijn er twee aanvulorders ontvangen van respectievelijk vier en acht SKU's. Een robot haalt een pod vanuit de voorraad (retrieval trip) en de werknemer plaatst hierop de aanvulorder. Wanneer de aanvulorder voldaan is, zal de behandelde pod terug in de voorraad gestockeerd worden (storage trip) (Merschformann et al., 2019).



*Figuur 7: Ophaal- en aanvulproces RMFS-systeem*

Bij een RMFS-systeem kunnen de pickers een vaste plek aannemen bij een werkstation waardoor hun reistijd tot nul gereduceerd wordt. De reistijd elimineren betekent een hogere pickratio. Er zijn verschillende aanwijzingen dat pickratio's substantieel kunnen verbeteren door gebruik te maken van RMFS-systemen, die hoofdzakelijk gebruikt worden door Amazon. Kiva systems LLC, het huidige Amazon Robotics LLC, was het eerste e-commerce bedrijf dat met een unieke oplossing kwam in het orderpicking proces (Wurman et al., 2008).

Elk paar van een ophaal- en opslagproces wordt gezien als een robotcyclus in het RMFS-systeem. Het rek gedragen door de robot zal gedurende de hele cyclus (opslag- of ophaalcyclus) niet worden neergezet. Het zal pas worden neergezet op de opslaglocatie die de robot bereikt op het einde van de cyclus. Het is dus niet altijd zo dat de pods eerst naar de voorraad worden gebracht en dan terug vertrekken voor een volgende trip. Als de mogelijkheid bestaat om de pod eerst nog langs een ander aanvul- of werkstation te brengen om zo aan een andere order te voldoen, zal dit gedaan worden. Het is dus perfect mogelijk dat pods langs verschillende werkstations passeren voor ze terug naar de voorraad gaan (Merschformann et al., 2019).

Om te navigeren doorheen het magazijn maken de robots gebruik van een waypoint systeem. Dit systeem is in de magazijnen uitgewerkt als een rooster op de grond. Het pad dat een bepaalde

robot zal afleggen is een opeenvolging van verschillende nodes of knooppunten. Belangrijk is dat de robots op hun pad worden begeleid om botsingen met andere robots te vermijden. Zo kunnen robots die geen rekken vervoeren onder gestationeerde rekken gaan staan om plaats te maken voor robots die bezig zijn met het vervullen van een order (Merschformann et al., 2018). De robots in het RMFS-systeem zijn bidirectioneel en beschikken over sensoren voor de detectie van obstakels op hun pad (Kim et al., 2020). Deze sensoren zullen ervoor zorgen dat de uptime van het systeem verhoogd wordt omdat robots zelf tot stilstand zullen komen wanneer er een obstakel op hun pad komt of indien een werknemer het magazijn moet betreden (Hanson et al., 2018). Zijn de robots niet uitgerust met deze stopsensoren, dan zal het hele systeem moeten worden stilgelegd als er een werknemer het magazijn betreedt. Robots die niet in staat zijn te stoppen of obstakels te detecteren zorgen voor een daling van de operationele tijd (uptime) (Hanson et al., 2018).

Een groot verschil met de meeste geautomatiseerde systemen is dat het waypoints systeem heel wat overhead inventory oplevert doordat de robots altijd een heel rek met voorraad transporteren en zich dus niet beperken tot de benodigde goederen (Merschformann et al., 2018).

### **2.1.2 Prestatie van het RMFS-systeem in vergelijking met andere picksystemen**

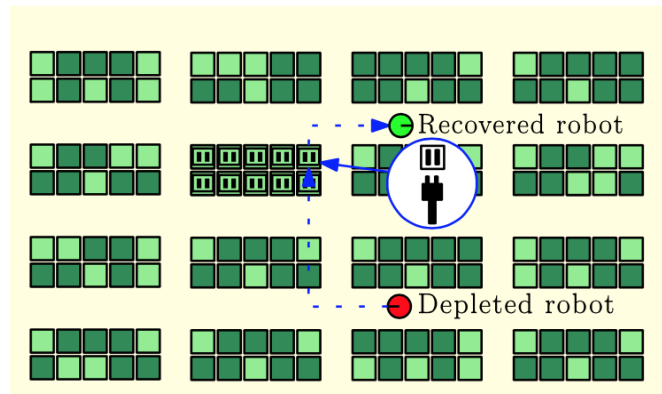
Het RMFS-systeem heeft een aantal kenmerken waar het systeem beter presteert ten opzichte van alternatieve systemen van orderpicking. Deze kenmerken zijn niet meteen gerelateerd aan het design van het magazijn of de context waarin het RMFS-systeem werkt. Kenmerken waarin het RMFS-systeem verschilt van alternatieve oplossingen voor orderpicking zijn uptime, productiviteit, flexibiliteit, gebruik van de beschikbare ruimte en pick accuraatheid (Hanson et al., 2018).

Over het algemeen kent een RMFS-systeem een hogere uptime dan alternatieve pick-systemen. Een RMFS-systeem heeft een hoge algemene uptime als het onderhoud en de herstellingen van de robots bij één robot tegelijk kunnen plaatsvinden. Wanneer een robot een storing vertoont of onderhoud nodig heeft, kan deze eenvoudig uit het systeem worden gehaald zonder gevolgen voor de rest van het systeem, dat kan blijven doorwerken met één robot minder (Hanson et al., 2018).

Verdere aandachtspunten zijn de laadmogelijkheden voor de robots omdat die een invloed hebben op de uptime van het systeem. Een RMFS-systeem maakt gebruik van robots die functioneren op batterijen en dus geen oneindige aansluitende capaciteit hebben. Batterijmanagement is naast het aantal robots, werkstations en de systeem lay-out, een belangrijk onderdeel van de performantie van het systeem (Zou et al., 2018). De robots van een RMFS-systeem werken op batterijen voor een normale shift van acht uur. Het is dus perfect mogelijk dat gedurende off-peak perioden de robots voor één shift per dag werken en hierna tijdens de nacht opladen in laadstations. In piekperioden als robots meerdere shiften moeten draaien, zullen de batterijen zonder capaciteit vallen tijdens de werktijd (Zou et al., 2018). Voor het herladen van de robots zijn er verschillende mogelijkheden zoals plug-in batterijen, inductieve oplading van batterijen en batterij swapping (Zou et al., 2018). De drie systemen zullen kort toegelicht worden in de volgende alinea. Het herladen van de batterijen zal een invloed hebben op de

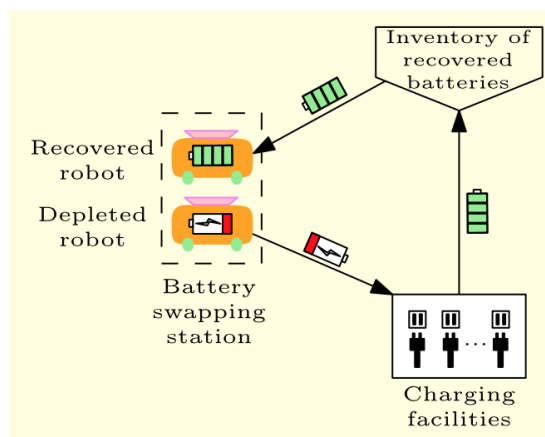
doorstroomcapaciteit van het systeem omdat er een deel van de robots in staat van laden zal vallen.

De eerste methode voor herladen is het gebruik maken van een plug-in batterij station (Figuur 8). Het laadstation bevindt zich in het midden van het magazijn. Elk magazijn voorziet een aantal laadpunten ( $N_c$ ), afhankelijk van de hoeveelheid actieve robots. Elke lader is in staat om één robot tegelijk op te laden. Er wordt een buffer voorzien, dichtbij het laadstation, waar robots kunnen wachten op hun oplaadbeurt. De robot zal volledig opgeladen worden in het laadstation (Zou et al., 2018).



Figuur 8: Plug-in laden

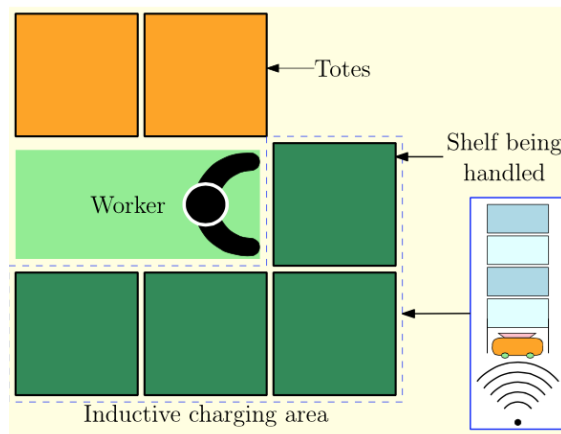
Een tweede methode voor herladen is batterij swapping (Figuur 9). De robots worden dan als de batterij leeg is voorzien van een nieuwe volle batterij. Wanneer de batterij leeg is, zal de robot begeleid worden naar het swapping station waar de lege batterij vervangen wordt door een volle batterij. De mogelijkheid bestaat dat er geen volledig geladen reserve batterijen beschikbaar zijn en dat robots moeten wachten. Gemiddeld wordt aangenomen dat een lege batterij binnen de 3000 en 4200 seconden (50/70 minuten) herladen is.



Figuur 9: Batterij swapping

Een derde methode voor herladen is het inductief laden. De maximale potentiële uptime zal stijgen door robots te herladen gedurende de tijd zijn dat ze operatief zijn (Hanson et al., 2018). Elk werkstation zal dan uitgerust zijn met een strip op de vloer die het inductief laden toelaat. De robot zal connecteren met het elektromagnetisch veld dat gecreëerd wordt door de strip en zo

opladen tijdens de wachtperiode aan het werkstation. Inductief laden doet het beter dan de twee andere methodes van laden in termen van jaarlijkse kosten. Wanneer bij de opstart van een RMFS-systeem geen rekening wordt gehouden met het laden van de robots zal het aantal benodigde robots onderschat worden evenals de systeemkosten met een schatting van 15% (Zou et al., 2018).



*Figuur 10: Inductief laden aan het werkstation*

Uit de flexibiliteit van het RMFS-systeem, blijkt dat de compartimenten van de voorraadpods goed kunnen aangepast worden om verschillende types en formaten van artikelen te kunnen vervoeren. De voorraadpods kunnen bijvoorbeeld aangepast worden om zowel goederen in dozen als goederen hangend in rekken te verwerken. Dit is voor third party logistics providers (3PL's) een aantrekkelijk element. Deze 3PL's zijn externe logistieke dienstverleners zoals verzendbedrijven, koeriersbedrijven en andere bedrijven die logistieke- en transportdiensten in onderaanneming integreren en aanbieden. Deze 3PL's krijgen veel te maken met contracten van korte duur en behandelde goederen verschillen vaak. Binnen eenzelfde RMFS-systeem is het mogelijk om meerdere types van voorraadpods te hebben en zo een breed gamma van verschillende goederen in het systeem te behandelen. Een element dat zorgt voor de hoge flexibiliteit van het systeem, is dat de modules (robots, pods en werkstations) gemakkelijk aangepast kunnen worden aan een veranderende vraag. Door modules toe te voegen of weg te halen kan de capaciteit van het RMFS-systeem binnen de grenzen van het magazijn gemakkelijk aangepast worden (Hanson et al., 2018).

Pick-accuraatheid is voor elk magazijn een belangrijke KPI om in het oog te houden. Het geeft aan hoeveel orders er accuraat of op tijd gepickt worden voor verzending. Een RMFS-systeem kan ingevuld worden met ofwel een "pick-and-pack" ofwel een "pick-and-pass" benadering. Binnen de "pick-and-pack" benadering zal dezelfde werknemer de goederen picken en verpakken. Binnen de "pick-and-pass" benadering zullen de goederen voor een order gepickt worden door een werknemer en zullen ze verpakt worden door een andere werknemer. De capaciteit van het systeem verhoogt door het aantal werknemers in het systeem aan te passen, zonder het aantal robots of werkstations te veranderen (Hanson et al., 2018). Vergeleken met manuele picksystemen kan pick nauwkeurigheid ondersteund worden door een RMFS-systeem. Door stationaire werkstations te voorzien binnen een RMFS-systeem wordt het makkelijker om ondersteunende systemen voor het picken te installeren. Deze ondersteunende systemen kunnen

gebruikt worden door de werknemers voor het scannen of tillen van goederen. In een manueel systeem bewegen de pickers zich doorheen het magazijn en halen ze goederen op binnen verschillende locaties waardoor het moeilijker is om ondersteunende systemen te gebruiken (Hanson et al., 2018).

Het gebruik van de beschikbare ruimte is een volgende eigenschap waarin het RMFS-systeem verschilt van andere picksystemen. Als er goederen gepickt worden van schappen heeft een RMFS-systeem een hoger gebruik van ruimte vergeleken met het manueel picken. Dit komt omdat de gangen die nodig zijn voor de robots die voorraadpods moeten ophalen smaller kunnen gemaakt worden dan de gangen nodig in een manueel systeem. Vergeleken met andere types van automatisatie zoals kraan- of shuttle gebaseerde systemen is bij het RMFS-systeem het gebruik van de beschikbare ruimte vaak kleiner. Dit komt omdat andere systemen gebruik kunnen maken van de hoogte van het magazijn wat voor een RMFS-systeem niet mogelijk is. Wanneer een magazijn beperkt is in hoogte, zal het RMFS-systeem veelal competitief zijn met andere geautomatiseerde systemen. Vaak wordt dan de flexibiliteit van het RMFS-systeem aangehaald om voor dit systeem te kiezen boven andere geautomatiseerde systemen (Hanson et al., 2018).

De investeringskosten van een RMFS-systeem zijn relatief laag vergeleken met andere geautomatiseerde systemen zoals kraan- of shuttle gebaseerde systemen. De duurzaamheid van het systeem of hoe snel het systeem aan vervanging toe zal zijn, is wel gerelateerd aan de behandelde volumes waardoor magazijnen met een groot aantal orders wel sneller hun systeem zullen moeten hernieuwen. Een RMFS-systeem kan best worden toegepast in een magazijn waar de behandelde volumes matig tot hoog zijn (Hanson et al., 2018). Wanneer de volumes laag zijn, is het veelal gepaster om gebruik te maken van een manueel systeem. In tegenstelling, wanneer de volumes zeer hoog zijn, bieden kraan- en shuttle gebaseerde systemen zoals AVS/RS-systemen een betere oplossing dan een RMFS-systeem (Hanson et al., 2018).

Het gebruik van een RMFS-systeem verandert de werkcondities voor de werknemers. In plaats van constant door het magazijn te bewegen, staan de werknemers in een RMFS-systeem aan een werkstation onder gecontroleerde en voorspelbare omstandigheden. Binnen dit systeem is het makkelijker om geschikte werknemers te vinden omdat lichamelijke problemen of beperkingen niet zo doorslaggevend zijn om er te kunnen werken. De fysieke werklast is lager doordat pickers statisch werken aan het werkstation. Ze moeten zelf niet bewegen doorheen het magazijn. Ook oudere werknemers zullen makkelijker aan het werk kunnen in een RMFS-systeem dan binnen een manueel systeem omdat de fysieke last lager is (Hanson et al., 2018). Het werk van de pickers is echter eentonig door het systematisch uitvoeren van dezelfde handelingen. Ook de weinig uitdagende taken zijn mentaal minder positief.

### **2.1.3 Voordelen van het RMFS-systeem in vergelijking met andere pick systemen**

Een voordeel van het RMFS-systeem dat hierboven aangehaald werd is dat het de reistijd van de werknemers elimineert (Merschformann et al., 2018). Andere voordelen van het RMFS-systeem die het gebruik van het geautomatiseerd systeem aantrekkelijk maken zullen hieronder worden verduidelijkt.

Een eerste voordeel van RMFS-systemen is dat wanneer een pod behandeld werd in een werkstation, deze kan terugkeren naar een andere dichtstbijzijnde opslagplaats, waardoor de terugweg verkort wordt. Het tweede en meteen ook grootste voordeel van RMFS-systemen is de flexibiliteit doordat er vrijwel geen vaste installaties zijn en de betrouwbaarheid door het gebruik van alleen homogene componenten die elkaar kunnen vervangen bij defecten (Merschformann et al., 2017). Een ander voordeel van een RMFS-systeem in vergelijking met een traditioneel parts-to-picker systeem is dat in een traditioneel systeem maar één item per keer verwerkt kan worden terwijl in een RMFS-systeem veel verschillende items verwerkt kunnen worden door de robots (Zou et al., 2018). Een picker kan dan een order in kortere tijd invullen en de doorstroomcapaciteit verhogen. De RMFS-systemen kennen ook betere schaalbaarheid en flexibiliteit dan de traditionele systemen. Dit houdt in dat de opslagcapaciteit gemakkelijk vergroot kan worden door extra schappen toe te voegen aan de 'pods'. Door de rekken hoger te maken kunnen er meer goederen op de 'pod' gestockeerd worden. De doorstroomcapaciteit van het systeem kan eenvoudig verhoogd worden door extra robots toe te voegen. Deze verhoging kent wel een bovengrens omdat een oneindig aantal robots elkaar zouden blokkeren in het verplaatsen doorheen het magazijn (Zou et al., 2018).

Als efficiënt orderpickingsysteem wordt beschouwd een systeem waarin meerdere orders binnen een minimale tijd behandeld worden (Van Gils et al., 2018). Binnen een efficiënt RMFS-systeem wordt elke orderpicker aan het werkstation idealiter constant voorzien van goederen om te picken. Dit wil zeggen dat er constant aan elk werkstation een pod aanwezig is. Om dit te kunnen bereiken zal de idle time, de tijd dat de pods niet bezig zijn met het vervullen van een order, tussen de wisseling van pods zo klein mogelijk moeten zijn (Xie et al., 2019).

## **2.2 Welke planningsbeslissingen komen voor in de academische literatuur**

Voor de werking van RMFS-systemen zijn er een heel aantal planningsbeslissingen, zowel op strategisch, tactisch als operationeel niveau. Tabel 1 geeft een algemeen overzicht van de beslissingen op zowel strategisch, tactisch als operationeel niveau. Het strategisch niveau van beslissingen verwijst naar het beleid en de plannen voor het gebruik van de middelen om op lange termijn aan de competitieve strategie te voldoen (Van Gils et al., 2018). Het tactisch niveau legt de nadruk op de impact op middellange termijn. Die beslissingen hebben een invloed op meer dan een dag, maar gaan minder lang mee dan de strategische. In tegenstelling tot de strategische beslissingen kan men eenvoudiger veranderingen aanbrengen op het tactisch niveau. Als laatste is er het operationeel niveau dat zich toelegt op de dagelijkse werking van het RMFS-systeem en dus van dag tot dag kan veranderen. Een voorbeeld van zo een beslissing is het toewijzen van de jobs per dag of hoe de batches met SKU's gevormd zullen worden (Van Gils et al., 2018). Deze masterproef zal zich specifiek richten op het operationele niveau van de RMFS-planningsbeslissingen.

Een heel aantal van deze planningsbeslissingen vereisen nog verder diepte-onderzoek. Hoe men orders van de consumenten zal toewijzen aan de werkstations is een voorbeeld van een operationele planningsbeslissing die nog verder onderzocht dient te worden. Deze

planningsbeslissing is een van de vele beslissingen die moeten genomen worden in RMFS-systemen (Wurman et al., 2008).

*Tabel 1: Planningsbeslissingen op strategisch, tactisch en operationeel niveau voor het RMFS-systeem*

<p>(1) <b>Strategisch niveau</b> – beslissingen bij constructie magazijn</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Plaats werkstations</li> <li>- Dimensionering opslagomgeving</li> </ul>
<p>(2) <b>Tactisch niveau</b> – beslissingen bij de start van de werkweek, werkdag of shift</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Aantal pods per SKU</li> <li>- Ratio tussen aantal pick- en aantal aanvulstations</li> <li>- Aanvulniveau</li> <li>- Herverdeling van de middelen</li> </ul>
<p>(3) <b>Operationeel niveau</b> – beslissingen in real time</p> <div style="text-align: center;"> <pre> graph TD     A["Toewijzing van de orders (OA) Toewijzing pickorders (POA) Toewijzing aanvulorders (ROA)"] --&gt; B["Taakcreatie (TC) • Podselectie (PS) • Pickpodselectie (PPS) • Aanvulpodselectie (RPS) • Opslagtoewijzing van pods (PSA)"]     B --&gt; C["Taakverdeling (TA)"]     C --&gt; D["Pad planning (PA)"]         </pre> </div>

De basisbeslissingen voor de dagelijkse processen binnen een RMFS-systeem zijn op basisniveau gelijk aan de beslissingen in een traditioneel magazijn (Boysen et al., 2017). Door de veranderde workflow, waarbij robots naar de pickers getransporteerd worden, is er een aanpassing van de verschillende beslissingen nodig (Boysen et al., 2017).



De beslissingen op het operationeel niveau worden door Merschformann et al. (2018) in vier stappen onderverdeeld. De eerste stap is de *toewijzing van de orders* waar de verschillende orders toegewezen worden aan een werkstation. De tweede stap is die van de *taakcreatie* voor de robots. Deze taken houden het picken van de pods voor zowel de aanvul- als pickorders in. De voorlaatste stap is die van de *taakverdeling* waarbij elke robot zijn specifieke taak uit stap twee krijgt toegewezen. De laatste stap van het operationeel niveau is de *planning van de paden*. Hier zullen de verschillende paden die de robots afleggen worden vastgelegd. Goede toewijzing algoritmes zijn belangrijk om het werk gedaan te krijgen met een kosten-efficiënte hoeveelheid robots (Wurman et al., 2008). Hoewel deze masterproef zich niet toelegt op de algoritmen en hun verklaring is hun belang niet te ontkennen.

De verschillende beslissingen op het operationeel niveau zoals de toewijzing van de orders, beslissingen rond de taakcreatie, taakverdeling en pad planning zullen in onderstaande Secties aan bod komen.

### **2.2.1 Toewijzing van de orders als operationele planningsbeslissing**

Binnen de stap van de *toewijzing van de orders* zijn nog twee verdere onderverdelingen gemaakt. Elk van deze toewijzingen vereist andere beslissingen. De *toewijzing van de pickorders (POA)* legt de focus op het toewijzen van pickorders aan de werkstations. Men gaat ervan uit dat er constant backlog is en de pickstations altijd in volle capaciteit met pickorders gevuld zijn (Merschformann et al., 2018). Backlog houdt alle orders van consumenten in die nog niet behandeld zijn en het magazijn dus nog niet hebben verlaten. Voor een optimale werking is het de bedoeling dat wanneer een pickorder volledig is ingevuld en het werkstation wordt verlaten door de pod, er een nieuw pickorder geselecteerd wordt uit de backlog. Dit zorgt ervoor dat orders op een chronologische volgorde worden behandeld (Merschformann et al., 2018).

De tweede onderverdeling is de *toewijzing aanvulorders (ROA)* of de toewijzing van de aanvulorder aan het aanvulstation. Als een aanvulorder aankomt en meerdere aanvulstations capaciteit over hebben, zal de ROA-beslissingsregel bepalen aan welk aanvulstation de aanvulorder toegewezen wordt. Is er geen plaats beschikbaar, dan worden aanvulorders in de aanvulbacklog gezet. Een nieuw aanvulorder wordt pas uit de aanvulbacklog gekozen als een vorig aanvulorder is uitgevoerd en dit volgens de FCFS-regel (First Come, First Served). Deze regel houdt in dat de eerst binnengekomen aanvulorder ook eerst behandeld zal worden (Merschformann et al., 2018).

Bij de werkstations worden de orderaankomsten in sets van orders onderverdeeld en opeenvolgend ingevuld. Bij deze onderverdeling is het de bedoeling om orders met SKU's op eenzelfde pod ook samen te behandelen zodat de pods niet onnodig meerdere keren moeten rijden. De beslissingen rond de verwerking van orders is nauw gerelateerd aan de aankomstvolgorde van de pods. Hoe beter de inhoud van de pods aanleunt bij de benodigde SKU's van de pickorder, hoe sneller de orders klaar zijn om verpakt en verstuurd te worden (Boysen et al., 2017).

### 2.2.2 Taakcreatie in het RMFS-systeem als operationele beslissing

In de tweede stap van de beslissingen op operationeel niveau zitten de beslissingen rond *de taakcreatie*. Ook hier wordt door Merschformann et al. (2018) een onderverdeling gemaakt in verschillende taken. Het proces van de selectie van pods is onderverdeeld in twee subsecties. Dit is belangrijk omdat de beslissingen voor het pick- en aanvulproces verschillen. Dit verschil komt er doordat voor het pickproces de vervaltijden van de pickorders belangrijk zijn voor de keuze van een pod (Merschformann et al., 2018). Belangrijk om op te merken is dat bij aanvulorders deze vervaltijd enkel voorkomt als de benodigde SKU's niet meer beschikbaar zijn op de pods. In deze situatie zullen de pods zo snel mogelijk terug moeten voorzien worden van de ontbrekende SKU's. Omdat orders van de consumenten moeten ingevuld raken binnen een bepaalde tijdspanne, is de vervaltijd hier belangrijk. *Pick pod selectie (PPS)* houdt de selectie in van pods die getransporteerd worden naar het werkstation. *Aanvul Pod selectie (RPS)* legt de focus op het selecteren van de pods voor de volgende aanvulorder (Merschformann et al., 2018). Voor een order die binnenkomt in het magazijn wordt er een pod geselecteerd met de benodigde voorraad. In de meeste situaties heeft een werkstation meerdere orders waaraan gewerkt wordt op hetzelfde ogenblik. Een pod kiezen kan uit een zeer groot aantal pods in de voorraad omdat zij allemaal de benodigde SKU's bevatten (Poudel et al., 2013). Verschillende pods rijden over een andere afstand tot het werkstation en kunnen meestal ook maar een deel van de openstaande orders aan het werkstation invullen. De beslissing die genomen moet worden uit zich dan in een multi-set multi-cover problem (Enright et al., 2011). Bij het selecteren van de optimale pod houdt men rekening met de voor- en nadelen van de selectie van een pod die al gepland staat om andere werkstations te bezoeken. Als een pod zich van het ene naar het andere werkstation verplaatst zonder terug in de voorraad terecht te komen, *station hopping*, wordt de tijd die de robot nodig heeft om de pod op te halen verdeeld over meerdere werkstations alsook de kost. Ook het terugkeren van de pod naar de voorraad wordt verdeeld over meerdere werkstations om in een kortere tijd en met lagere kost meer orders in te vullen (Enright et al., 2011). Toch heeft *station hopping* het nadeel dat er vertraging zit op het aankomen in het werkstation. Als de pod het eerste werkstation bereikt, haalt de werknemer de benodigde goederen uit de pod waarna deze zich verplaatst naar het volgende werkstation. Het tweede werkstation is afhankelijk van de snelheid van de eerste werknemer en zal langer moeten wachten op de pod dan wanneer deze rechtstreeks uit de voorraad gehaald wordt. De beslissingen rond de optimale opvolging van de werkstations is een traveling salesman problem (Enright et al., 2011). Het algemeen doel is dat wanneer de centrale server van het RMFS-systeem de lijst met orders ontvangt, deze server de beschikbare goederen in de pods scant en de pod met de best fit of die met de meest benodigde goederen aan het werkstation eruit haalt (Poudel et al., 2013).

Als goederen aankomen in het magazijn worden de SKU's weggezet in de pods. Binnen een RMFS-systeem is niet een specifieke pod bepalend voor de pick pod selectie (PPS) maar de SKU's die ook op de pod staan. Meestal wordt een gedeelde opslag policy toegepast waar SKU's van dezelfde soort niet worden samengezet in een unieke pod, maar verspreid over verschillende pods. Het voordeel hiervan is dat een specifieke order ingevuld kan worden door verschillende pods. Hoe meer pods de SKU's bevatten, des te meer keuze er is uit verschillende pods om een order te

voldoen. Hierdoor verhoogt ook de kans dichtbij een pod met de benodigde SKU's te vinden (Boysen et al., 2017).

Een andere beslissing op het operationeel niveau binnen de taakcreatie is de *opslagtoewijzing van de pods (PSA)*. Deze beslissing bepaalt waar men een bepaalde pod zal stockeren als deze het werkstation verlaat (Merschformann et al., 2018).

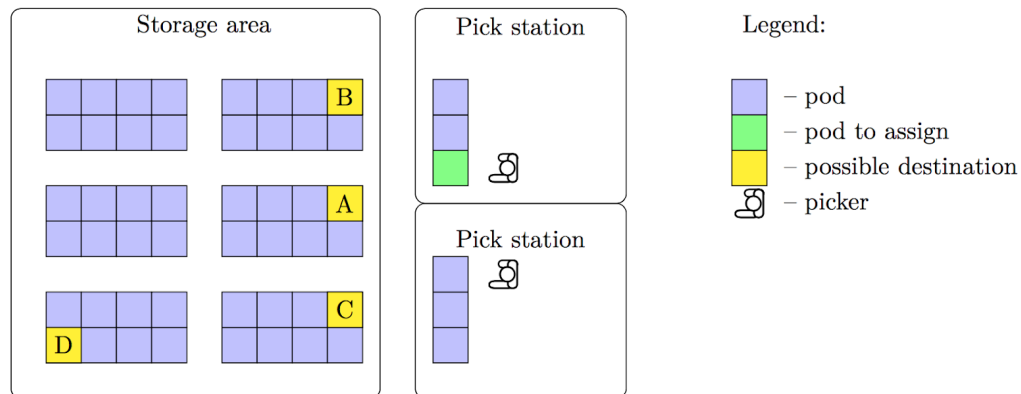
Producten classificeren volgens hun omzet lijkt voordelig als de pods worden toegewezen aan een locatie. Producten die veel verkocht worden, hebben best een zo kort mogelijke afstand tot het werkstation. Dit kan men realiseren door de bekende cube-per-order index van Heskett toe te passen. Deze cube-per-order index is de ratio tussen de benodigde ruimte om het item te stockeren tegenover de populariteit van het item (Kim et al., 2020). Zo worden de veel verkochte items dicht bij de werkstations geplaatst. Zo zullen ze dus sneller aan de werkstations zijn doordat hun afstand tot het werkstation verkleind is. Malmborg en Bhaskaran (1990) toonden aan dat men door het toepassen van de COI-regel, de optimale oplossing voor het stockeren van de pods bereikt. Het RMFS-systeem zorgt voor een constante herpositionering van de pods als de vraag verandert (Boysen et al., 2017).

Deze continue herpositionering houdt verband met de beslissingen van de opslagtoewijzing van pods. Pods die terugkeren van de werkstations naar de voorraad nemen niet altijd dezelfde plaats aan in de voorraad aan wat leidt tot meer flexibiliteit en aanpasbaarheid. De pods die zelden gebruikt worden kunnen echter prominente opslaglocaties blokkeren en zo optimale opslaglocaties bezet houden. Een oplossing voor dit probleem zou het expliciet verplaatsen van deze pods (actieve herpositionering) kunnen zijn (Merschformann, 2018).

De eerste vorm van herpositionering is passieve herpositionering. *Passieve herpositionering* is een natuurlijk deel van het RMFS-systeem wanneer de opslaglocaties van de pods niet vast bepaald zijn. In de meeste situaties zijn de volgende beschikbare opslaglocaties superieur aan een vaste strategie waarbij elke pod zijn vaste opslaglocatie heeft. Vaak wordt hiervoor gekozen omdat deze strategie de reistijden van de robots verlaagt en ze sneller beschikbaar zijn voor de volgende order (Merschformann, 2018). Het nadeel van deze strategie is dat pods die niet langer nodig zijn, gestockeerd worden op prominente plaatsen waardoor het probleem van de blokkades van prominente plaatsen ontstaat. Men kan dit probleem op twee manieren aanpakken. Een eerste mogelijkheid is om de inhoud (SKU's) op de pod mee te nemen in de beslissing voor stockage. Dit wil zeggen dat pods die goederen vervoeren waarnaar weinig vraag is, actief meer achteraan in het magazijn te stockeren. Bij een andere optie kiest men voor het actief herpositioneren van de pods. De pods worden dan actief verplaatst van de ene opslaglocatie naar een andere en minder prominente opslagplaats (Merschformann, 2018). Actieve herpositionering vraagt wel meer robots om deze pods actief verzetten en die hebben dus minder tijd om orders te vervullen (Merschformann, 2018). Biedt het actief verplaatsen van deze pods, ze opheffen en op een andere locatie neerzetten een oplossing om de algemene doorstroom van het systeem te verhogen (Merschformann, 2018)?

De vraag die hier centraal staat is "waar zullen we de pod stockeren nadat deze het werkstation gepasseerd is?". Onderstaande Figuur 11 geeft een intuïtieve ondersteuning voor deze redenering. Het groene vak is waar de pod zich momenteel bevindt. De vier mogelijke

opslaglocaties zijn A, B, C en D. Waar men de pod terug zal stockeren, is afhankelijk van de situatie en wat men achteraf wil doen met de pod. Zo zal men voor plaats A kiezen als de pod zo dicht mogelijk bij het huidige werkstation gestockeerd moet worden. Plaats B is ideaal voor het transport van de pod naar het bovenste werkstation omdat de afstand hier minimaal is. Plaats C is optimaal wanneer de volgende halte het onderste werkstation is. Plaats D dient om de pod te stockeren die niet gebruikt zal worden. Op A, B en C worden pods gestockeerd voor frequenter gebruik (Krenzler et al., 2018). Dit stockageprobleem wordt ook het pod herpositioneringsprobleem genoemd (PRP).



*Figuur 11: Mogelijke stockeringsplaatsen van de pods*

Onder de operationele beslissingen hoort ook de taakverdeling van de robots. Bij het toewijzen van de robots zijn er drie problemen die naar voor komen (Enright et al., 2011). Eerst moet er beslist moeten worden welke robot wordt toegewezen aan de pod die naar het werkstation getransporteerd moet worden. Als er in een RMFS-systeem duizend robots actief zijn die er elk 5 minuten over doen om voorraad te leveren dan zijn er elke seconde drie tot vier robots die hun pod neerzetten (Enright et al., 2011). Deze robots kunnen dan met een nieuwe taak starten. Verder is er de mogelijkheid om inzicht te krijgen in de robots die gaan vrijkomen. De vele pods die getransporteerd moeten worden en de robots die vrij zijn of vrij gaan komen in de nabije toekomst zorgen voor een matching probleem. De tijd die de robot nodig heeft om de pod te bereiken zo klein mogelijk houden, lost dit probleem op (Enright et al., 2011).

Vervolgens is het belangrijk de tijd die robots spenderen aan het aanschuiven aan het werkstation te minimaliseren en geen robots naar het werkstation te sturen tegen een sneller tempo dan de werknemer ze kan verwerken. Niet elke werknemer werkt even snel en bepaalde producten zijn moeilijker te picken dan andere, wat de oplossing voor dit probleem niet vergemakkelijkt. Een derde element om rekening mee te houden in de toewijzing van de robots is de plaats van het werkstation in het magazijn. Sommige werkstations liggen dicht bij de voorraad terwijl andere zich in een uithoek van het magazijn bevinden. In deze uithoeken stijgt dus de gemiddelde tijd om voorraad te leveren (Enright et al., 2011).

### **2.2.3 Planning van de paden binnen het RMFS-systeem**

Onder nummer vier op het operationeel niveau in de Figuur van Merschformann et al. (Tabel 1) wordt gekeken naar de planning van de paden (PP) voor de robots. De bedoeling is hier

beslissingen te nemen over hoe robots zich gaan voortbewegen doorheen het magazijn zonder elkaar te hinderen. In een RMFS-systeem navigeren de robots zich doorheen het magazijn via nodes. Deze nodes bestaan uit sensors die de robots kunnen scannen. Door het connecteren van nodes wordt er in het magazijn een raster getekend (Poudel, 2013).

Pad planning voor een systeem met één robot is een van de meest bekende en best begrepen onderdelen van het RMFS-systeem. Dit komt vooral omdat het hele magazijn uitgestippeld is als een raster op de grond. Als de robot slechts één werkstation per keer bezoekt, zal het A\* algoritme voor de robot het kortste en het meest efficiënte pad aangeven (Poudel, 2013). A\* is een algoritme om de kortste weg tussen twee verschillende punten te vinden, in deze situatie de nodes (Hart et al., 1968). Binnen het RMFS-systeem wordt vaak het Dijkstra's algoritme geprefereerd. Dit algoritme is in staat om voor beide situaties, één werkstation bezoeken of meerdere, een oplossing te vinden (Poudel, 2013). Het A\* algoritme wordt toegepast in magazijnen waar maar één robot actief is. Voor meerdere robots binnen één systeem biedt het Dijkstra algoritme de meest efficiënte oplossing.

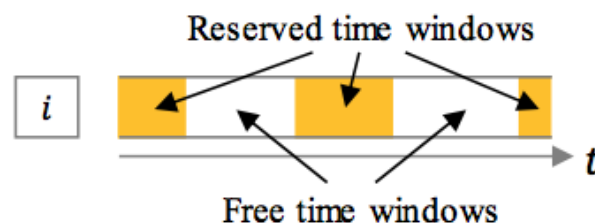
#### *Oplossingen voor het stilvallen van het systeem*

Een ander aspect dat rechtstreeks verband houdt met de planning van de paden is hoe omgegaan wordt met het stilvallen van robots. Belangrijk is dus bekijken hoe het RMFS-systeem de tijd verdeelt onder de robots. Robots beginnen pas te bewegen doorheen het magazijn als het hele pad dat ze zullen afleggen gereserveerd is volgens tijdsvensters. Voor de methode op basis van een tijdvenster wordt er gewerkt met een grafiek met een tijd-as die gereserveerde en vrije tijdsvensters bevat. Figuur 12 geeft een voorbeeld van zo een tijd-as (Lienert et al., 2019).

Het A\* algoritme wordt gebruikt om het kortste pad van de start node naar de eindnode (het werkstation) te vinden. Het A\* algoritme kijkt in elke stap voor welke node de waarde van F gelijk is aan de som van G(n) en H(n). De laagste uitkomst voor F geeft de node die gekozen zal worden.

$$F(n) = G(n) + H(n)$$

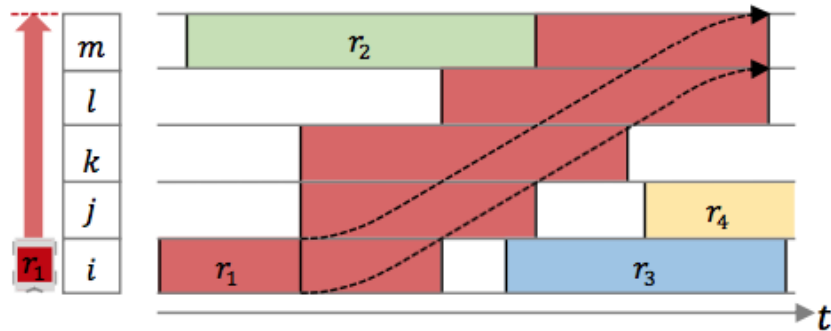
G(n) staat voor de lengte van het pad van de startnode tot n. H(n) is een heuristiek die de kost van het goedkoopste pad van n naar de doelnode geeft. Door het A\*algoritme toe te passen is het mogelijk het kortste pad tot de eindnode te bepalen.



*Figuur 12: Tijd-as met gereserveerde tijdsvensters*

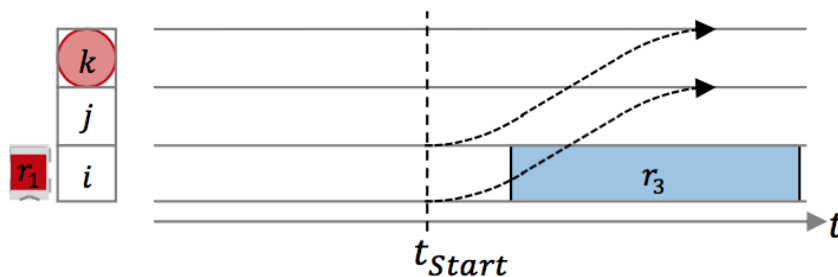
Figuur 13 laat een tijdsverdeling zien voor verschillende robots. Robot één (r1) tot en met robot vier (r4) is een route toegekend waar verschillende nodes (i,j,k,l,m) gepasseerd zullen worden. Voor elk van deze routes is er een tijdvenster gereserveerd waarin ze de node zullen passeren. Robot één heeft een route toegekend gekregen waarbij vijf nodes gepasseerd worden. De andere

robots zullen op hun route tot het werkstation maar één node passeren (Lienert et al., 2019). Wanneer robot twee ( $r_2$ ) vertraagd is, zal robot één ( $r_1$ ) gedwongen worden een tussenstop te maken op node l. Dit komt doordat robot twee op de tijdas eerst gepland staat om node m te passeren. Een belangrijke kanttekening hierbij is dat de gereserveerde tijdsvensters niet alleen de passagetijd van de robots bevatten maar ook een buffertijd om botsingen te voorkomen wanneer het systeem vertragingen oploopt (Lienert et al., 2019).



Figuur 13: Nodes en reservaties van andere robots

Omdat er op het gewenste tijdstip geen beschikbare route was, leidt deze routeringsprocedure niet altijd tot een succesvol resultaat. De eerste reden is dat er een oneindige tijd gereserveerd kan zijn door een inactieve robot op een bestemmingsnode of op een node die noodzakelijk is om de bestemming te bereiken. Een tweede reden is de kans dat een tijdsvenster voor het starten van een nieuwe route gebonden is aan een andere reservatie. Figuur 14 laat zien dat een route naar bestemmingsnode k niet succesvol is op  $t_{start}$  omdat robot drie ( $r_3$ ) een tijdsvenster gereserveerd heeft op node i. Pas als robot drie start aan zijn route kan robot één ( $r_1$ ) beginnen aan zijn route tot node K (Lienert et al., 2019).



Figuur 14: Routing was niet succesvol door een andere reservatie op de start-node

Er zijn verschillende redenen voor het uitvallen van het systeem. Het uitvallen van de energietoevoer, onvoldoende onderhoud en onstabiele ladingen kunnen zorgen dat het RMFS-systeem tot stilstand komt (Lienert et al., 2019). Vier strategieën voor het omgaan met het stilvallen van het systeem worden hieronder beschreven, namelijk het negeren van het stilvallen, het pauzeren, het herstarten en herrouteren.

Het negeren houdt in dat als er een fout optreedt, de robot stopt en op de node blijft staan zodat deze ook voor andere robots geblokkeerd is. Als zij gepland stonden om via deze node te passeren, zullen ze hun pad niet kunnen voortzetten. Wanneer de mean time to repair (MTTR)

verlopen is, zal de stilgevallen robot zijn route hernemen en komt de node vrij voor andere robots (Lienert et al., 2019).

Een tweede strategie is het pauzeren. Hier wordt bij het stilvallen van een robot het hele systeem in pauze gezet en moeten ook de robots waarvan de route niet langs de node met de geblokkeerde robot komt, stoppen. Pas nadat de MTTR verlopen is, zullen alle robots hun oorspronkelijke pad hernemen. Door deze strategie toe te passen kent het hele systeem een aanzienlijke vertraging (Lienert et al., 2019).

Het herstarten van het systeem nadat een robot is stilgevallen, is een andere strategie om systeemfalingen binnen het RMFS-systeem te benaderen. Binnen deze strategie zal bij het stilvallen van een robot het hele systeem worden stilgelegd. Alle robots stoppen op hun route. Er zal een heel nieuw routeplan opgesteld worden zo gauw de robots tot stilstand zijn gekomen. De geplande en huidige routes worden geannuleerd en een herberekening volgt. De defecte robot zal een oneindig tijdsvenster innemen voor de huidige node tot het probleem opgelost is. Geen enkele andere robot kan deze node passeren en toegewezen krijgen op zijn nieuwe route zolang het probleem nog bestaande is (Lienert et al., 2019).

De laatste strategie is de herroutering. Binnen deze strategie worden enkel de robots die moeten passeren langs de geblokkeerde node omgeleid. Als een robot stilvalt, zullen de robots die langs deze node gepland stonden, stoppen. Robots met een tijdsvenster gereserveerd voor de geblokkeerde node worden geherrouteerd. Er zal een oneindig tijdsvenster toegekend worden aan de geblokkeerde node zodat geen enkele andere robot deze nog kan passeren totdat het probleem verholpen is (Lienert et al., 2019).

Andere beslissingen die door Merschformann et al. (2017) aangehaald worden zijn deze van station activatie (SA) en method management (MM). Method management is het veranderen van het controlemechanisme in een werkend systeem. Een voorbeeld hiervan is het tijdens de werkuren vervangen van de PSA-controller door een andere om zo te kunnen aanpassen aan veranderende condities (Merschformann et al., 2017).

Alhoewel het mogelijk zou zijn om de planningsproblemen omtrent de toewijzing van de robots in RMFS-systemen als een algemeen planningsprobleem voor alle magazijnen te zien, wordt aangeraden dit niet te doen om verscheidene redenen (Wurman et al., 2008).

Ten eerste zullen de beslissingen rond de toewijzing van de robots op het moment zelf genomen moeten worden. Deze realtime beslissingen zijn nodig omdat er geen tijdspanne is om offline deze toewijzing te bepalen. Klanten plaatsen de hele dag door orders waarvan ze vaak verwachten dat de orders nog dezelfde dag verzonden worden. Hierdoor zullen taken in het magazijn constant opnieuw gerangschikt moeten worden om overeen te stemmen met de vrachtwagenplanningen van de verzendbedrijven. Zo zullen de orders met de kortste due time (vervaltijd) eerst worden behandeld om ervoor te zorgen dat de verzending binnen de dag gehaald wordt. De robot die het meest efficiënt kan werken, zal dan geselecteerd worden om de goederen op te halen. Door geen vooropgesteld schema te maken voor de robots maar enkel in real time beslissingen te nemen, kunnen de robots ingezet worden op de order die het meest urgent is op dat moment (Wurman et al., 2008).

Ten tweede zijn de probleembeschrijvingen vrij groot, omdat deze duizenden orders en dus tienduizenden bin keuzes inhouden. Bins staan op de pods voor de stockering van goederen. Een pod kan meerdere bins bevatten en dus ook meerdere goederen. Wanneer een bin leeg is, wordt deze beschikbaar voor nieuwe goederen. In tegenstelling tot andere magazijnsystemen moet binnen het RMFS-systeem een voorraadlocatie niet telkens met dezelfde goederen worden gevuld (Enright et al., 2011). Beslissingen worden genomen voor verschillende orders en verschillende formaten, en dit maakt het onmogelijk om alle orders als eenzelfde probleem te beschouwen. Omdat de optimale oplossing ook afhangt van interacties en actuele paden van de robots, is de globalisatie van het probleem minder aantrekkelijk. Het proces van interactie tussen de robots is dynamisch én constant aanpasbaar aan de veranderende behoefte voor goederen. Als laatste is er de humane interactie met een variabele en onvoorspelbare responstijd. Door de variabiliteit van mensen en de dynamische natuur van het systeem worden geoptimaliseerde oplossingen fragiel en kunnen ze door een kleine verandering in de behoefte van de klanten niet meer optimaal zijn (Wurman et al., 2008).

Tabel 2: Overzicht van de beslissingen en hun trigger.

<b>Afkorting</b>	<b>Beschrijving</b>	<b>Naam</b>	<b>Trigger</b>
<b>POA</b>	Een pickorder kiezen van de backlog	<i>Toewijzing pickorder</i>	<i>Wanneer een andere pickorder voldaan is en het werkstation verlaat wordt er ruimte gecreëerd voor de volgende pickorder.</i>
<b>ROA</b>	<i>Selecteren aanvulstation voor de volgende aanvulorder</i>	<i>Toewijzing aanvulorder</i>	<i>Wanneer een aanvulorder aankomt in het systeem en één of meerdere aanvulstations hebben capaciteit over.</i>
<b>PPS</b>	<i>Selectie van de pod om naar het werkstation te transporteren</i>	<i>Pickpod selectie</i>	<i>Wanneer een robot werkende voor een werkstation nood heeft aan een nieuwe taak.</i>
<b>RPS</b>	<i>Selecteren van een pod voor de volgende aanvulorder</i>	<i>Aanvulpod selectie</i>	<i>Hangt af van de ROA-beslissingsregel</i>
<b>PSA</b>	<i>Kiezen van een opslaglocatie voor de pod</i>	<i>Opslagtoewijzing pods</i>	<i>Als een pod een werkstation verlaat</i>



## **2.3 Relaties tussen verschillende planningsbeslissingen in het RMFS-systeem**

De verschillende operationele planningsbeslissingen die genomen moeten worden binnen een RMFS-systeem hebben invloed op elkaar. In deze Sectie staan relaties beschreven tussen beslissingen die samen kunnen werken en zorgen voor een synergie of elkaars succes kunnen tegenwerken (Merschformann et al., 2017).

Binnen het RMFS-systeem heeft de toewijzing van de pickorders (POA) een invloed op de doorstroom van het hele systeem (Xie et al., 2019). Om betere resultaten te bekomen is het aangeraden om de beslissing van de toewijzing van pods aan werkstations (PPS) samen te nemen met de toewijzing van de pickorders (POA) (Xie et al., 2019). Pickorder toewijzing (POA) en pickpod selectie (PPS) hebben een relatie met elkaar. Eén van de doelen binnen een RMFS-systeem is het gemiddelde aantal picks per behandelde pod zo hoog mogelijk houden. De picks per behandelde pod noemt men ook de 'pile-on'. Hoe hoger de pile-on, hoe minder pods nodig zijn aan de werkstations. Door deze maximalisatie hangt de pickpod selectie af van de selectie van het werkstation. Als gelijkaardige orders toegewezen worden aan eenzelfde werkstation kiest men, om zo het aantal picks te maximaliseren, voor een pod die het grootste aantal benodigde SKU's heeft (Merschformann et al., 2017). Door de pile-on te maximaliseren kan men de pickratio verhogen met minder robots en een kortere reistijd bekomen (Merschformann et al., 2017).

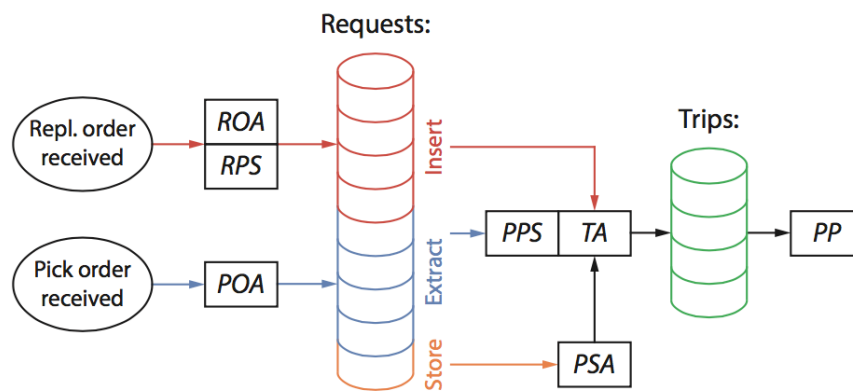
Een volgende relatie is er tussen de opslagtoewijzing van de pods (PSA), de taakverdeling (TA) en de planning van de paden (PP). Binnen het RMFS-systeem is het de bedoeling om aan alle orders te voldoen en hierbij de reistijden, maar ook het aantal robots te minimaliseren. Dit kan als een robot meerdere werkstations per pad bezoekt. Essentieel om dit goed te laten verlopen is de optimale verdeling van SKU's over de pods zodat meerdere pods aan een toekomstige order kunnen voldoen. De opslaglocaties van de pods hebben een invloed op de performantie van de toewijzing van de taken. Pods gestockeerd volgens een optimaal voorraadbeleid, waarbij veel gevraagde pods of pods met veel gevraagde SKU's voorraan staan, zullen ook sneller de werkstations bereiken. Naast het optimaal stockeren van de pods heeft het juist toewijzen van de paden ook een grote invloed op de performantie van het systeem (Merschformann et al., 2017).

In het RMFS-systeem is er een hiërarchie voor de planningsbeslissingen van nieuwe aanvul- of pickorders. Wanneer een nieuwe aanvulorder binnenkomt, zal er eerst een pod (RPS) en replenishment station (ROA) worden gekozen. Deze keuzes leiden tot een aanvraag (insert) bij een van de robots om de pod naar het gekozen aanvulstation te transporteren. Een aantal van deze aanvragen worden gecombineerd, waarna deze door de taakverdeling (TA) over robots verdeeld worden (Merschformann et al., 2017).

Wanneer een pickorder in het RMFS-systeem vanuit de backlog binnenkomt en toegewezen wordt aan een werkstation, wordt er een aanvraag tot ontrekking (extract) gegenereerd. Deze ontrekkingsaanvraag houdt de aanvraag van het ophalen van de juiste pod uit de voorraad in. De specifieke SKU's die nodig zijn, worden pas geselecteerd na de combinatie van verschillende ontrekkingsaanvragen en de verdeling ervan (TA) over de robots. Door dit uitstel kunnen de robots met het kortste pad toegewezen worden aan een van de werkstations. Om deze reden zijn

nauwe relaties aangenomen tussen de pickpod selectie (PPS) en taakverdeling (TA) (Merschformann et al., 2017).

Telkens een pod naar de voorraad getransporteerd moet worden, wordt een aanvraag tot stockeren gegenereerd in het RMFS-systeem. De opslagtoewijzing van pods (PSA) staat in voor de keuze van de stockageplaats van de pod. De inactieve of vrije pods worden gestockeerd op rustplaatsen (dwell points) in het midden van het magazijn om het blokkeren van prominente opslaglocaties bij de werkstations te vermijden. Alle taken binnen het RMFS-systeem bestaan uit trips gepland via algoritmes van padplanning (PP) (Merschformann et al., 2017). Figuur 15 geeft ondersteuning bij het begrijpen van de relaties hierboven beschreven. Bovenstaande relaties worden schematisch voorgesteld in Tabel 3. Appendix A van deze masterproef geeft een gedetailleerde tabel weer met de wetenschappelijke literatuur en de planningsbeslissingen die zij beschrijven.



Figuur 15: Beslissingshierarchie in het RMFS-systeem

Tabel 3: Relaties tussen planningsbeslissingen in de literatuur

	POA	ROA	PPS	RPS	PSA	TA	PP
POA			2				
ROA						1	
PPS						1	
RPS						1	
PSA						2	1
TA							2
PP							



### **3 Planningsbeslissingen in magazijnen met een AVS/RS-systeem**

Sectie 3.1 zal een beschrijving geven van het AVS/RS-systeem en de werking ervan. De voor- en eventuele nadelen van het systeem evenals de opbouw en werking ervan worden besproken. Sectie 3.2 bespreekt welke operationele planningsbeslissingen er genomen moeten worden in magazijnen die werken met een AVS/RS-systeem. Ten slotte wordt in Sectie 3.3 bekeken welke relaties er bestaan tussen de verschillende planningsproblemen in de wetenschappelijke literatuur.

#### **3.1 De werking en het succes van AVS/RS-systemen**

Door de vooruitgang op het gebied van globalisering en technologie worden de distributie- en magazijnactiviteiten steeds belangrijker voor de supply chain-operaties (Roy et al., 2012). In een poging om concurrentieel te blijven, zetten de magazijnen in op geautomatiseerde technologieën om de flexibiliteit en het reactievermogen bij de verwerking van opslag- en ophaaltransacties te vergroten. In het bijzonder onderzoeken veel magazijnen Autonomous Vehicle-based Storage and Retrieval Systems (AVS/RS-systemen) om aan de behoeften van de markt te voldoen (Roy et al., 2016).

In de volgende subsecties wordt er dieper ingegaan op de werking en het succes van de AVS/RS-systemen. Meer bepaald wordt er in Sectie 3.1.1 toegespitst op de overgang van de traditionele op kranen gebaseerde AS/RS-systemen naar de nieuwe AVS/RS-systemen. Sectie 3.1.2 haalt de verschillende soorten AVS/RS-systemen aan. Hierna wordt de werking ervan besproken in Sectie 3.1.3. De grootste verschillen worden in Sectie 3.1.4 onder de loep genomen.

##### **3.1.1 Van AS/RS naar AVS/RS**

AVS/RS-systemen bieden een alternatief voor de traditionele, op kranen gebaseerde systemen voor geautomatiseerde opslag- en ophaaltransacties met eenheidsladingen (Kuo, 2008). De verschillende patronen van ladingsbewegingen maken de AVS/RS-systemen flexibeler dan een AS/RS-systeem. In een typisch AS/RS-systeem is één kraan per gangpad verantwoordelijk voor het uitvoeren van de eenheidsladingen. Daarom zijn de kranen gangpadvast. Dit leidt tot hogere kapitaalkosten en een lager gebruik van material-handling-apparatuur (Heragu et al., 2011). In tegenstelling tot de opslagkranen van een AS/RS-systeem zijn de autonome shuttles (AV's) van een AVS/RS-systeem echter niet gangpadvast en kunnen ze elke opslagplaats in het magazijn bedienen (Ekren & Heragu, 2009). Extra autonome shuttles en liften die naar wens kunnen worden toegevoegd of verwijderd in het AVS/RS-systeem en shuttles die niet aan een specifieke gang worden toegewezen verhogen de flexibiliteit om met minder shuttles aan de doorvoerbehoefte te voldoen (Heragu et al., 2011). Vanuit operationeel oogpunt is flexibiliteit dus een voordeel van AVS/RS-technologie om shuttles en liften toe te wijzen op basis van het niveau van de vraag naar transacties en de configuratie van de opslagrekken in een systeem (Malmborg, 2003). Tabel 4 geeft een overzicht van de grootste verschillen tussen de AS/RS-systemen en de AVS/RS-systemen.

Het tweede voordeel van AVS/RS-systeem is de modularisering. Omdat één kraan één gangpad bedient in een typisch AS/RS-systeem en omdat het uitbreiden van het magazijn, dus het toevoegen van meer gangen, ook het aankopen van meer kranen betekent, is het duidelijk dat zelfs een kleine verandering in AS/RS-systeem leidt tot een kostelijk herontwerp van het gehele systeem. Zo zijn de kosten van de initiële investering ongeveer 634.000 dollar voor één enkele AS/RS-gang en moet er bijkomend meer geïnvesteerd worden in controlesystemen (Roodbergen & Vis, 2009). Verschillende delen binnen een AVS/RS-magazijn kunnen met een minimale impact op andere gebieden eenvoudig worden herontworpen. Zo kan bijvoorbeeld het aantal liften worden gewijzigd om te voldoen aan hogere doorvoervereisten, terwijl andere configuratieparameters constant blijven (zoals het aantal gangen, de diepte/breedteverhouding (D/W) van elke gang en het aantal niveaus) (Heragu et al., 2011). Ook kan meer doorvoercapaciteit gecreëerd worden door het aantal autonome shuttles aan te passen aan de vraag (Ekren & Heragu, 2009). Bovendien kan de betrokken shuttle voor onderhoud gemakkelijk uit het systeem worden gehaald en door een nieuwe vervangen worden, zonder dat de prestaties van het systeem hieronder lijden (Roy et al., 2012). Een ander voordeel is dat elke shuttle toegang heeft tot elke willekeurige opslaglocatie in het systeem. Meerdere shuttles kunnen tegelijkertijd toegang hebben tot dezelfde opslagplaats met als nadeel mogelijk blokkeringen (Malmberg, 2003).

Bovenstaande argumenten lijken aantrekkelijk. Toch moeten de voordelen van dergelijke flexibiliteit altijd worden gezien in de grotere context van de prestatiemogelijkheden en de bijbehorende kosten (vast en operationeel) van de verschillende technologieën (Roy et al., 2012). De belangrijkste nadelen van het AVS/RS-systeem liggen in langere doorlooptijden van opeenvolgende verticale en horizontale verplaatsingen en wachttijden voor liften en shuttles (Marchet et al., 2012). Voor AVS/RS zijn ook complexere besturingssystemen nodig om de shuttles te managen en botsingen tussen de shuttles te vermijden (Malmberg, 2003).

Tabel 4: Vergelijking van kenmerken van AS/RS-systeem en AVS/RS-systeem (Roy et al., 2015)

<b>Fysieke indeling</b>	Eén LU-punt per gang, Transportbanden en kranen in het gangpad als opslag- en ophaalapparatuur	Een LU-punt per zone, Voertuigen en liften als opslag- en ophaalapparatuur
<b>Beweging van de ladingen</b>	Tchebychev	Rechtlijnig
<b>Bufferen van de ladingen (waar?)</b>	Eén buffer per gangpad	Eén buffer per zone
<b>Doorvoercapaciteit</b>	Bepaald door de capaciteit van de kraan per gang en het aantal gangen	Bepaald door het aantal voertuigen en liften

### 3.1.2 Verschillende soorten AVS/RS-systemen

In de horizontale AVS/RS-systemen vervoeren de autonome shuttles, met behulp van liften, eenheidsladingen tussen een opslaglocatie en een werkstation. Recentelijk zijn er nieuwe robotoplossingen ontstaan, waarbij de shuttles niet alleen horizontaal kunnen bewegen, maar ook tot verschillende niveaus kunnen stijgen door diagonaal of verticaal te bewegen. Daarom kan het

AVS/RS-systeem op basis van de bewegingsmogelijkheden van de shuttles in drie categorieën worden ingedeeld: horizontale, verticale en diagonale systemen. In de horizontale variant bewegen de robots alleen horizontaal en gebruiken ze liften voor het verticale transport. In de nieuwste variant: verticaal, kunnen de robots ook verticaal in het rek rijden (Azadeh et al., 2017).

#### *Horizontale AVS/RS-systemen*

Het *horizontale AVS/RS-systeem* gebruikt de combinatie van autonome shuttles en liften om de opslag- en ophaaltransacties van orders uit te voeren. Autonome shuttles bewegen in horizontale richting met behulp van rails en worden met behulp van liften in verticale richting getransporteerd (Azadeh et al., 2016). De opslagruimte in een AVS/RS-systeem bestaat uit gangpaden met aan beide zijden meerlaagse opbergrekken en een dwarsgang die loodrecht op de gangpaden loopt. Figuur 16 toont hoe een horizontaal AVS/RS-systeem er uit kan zien.



*Figuur 16: Adapto AVS/RS-systeem*

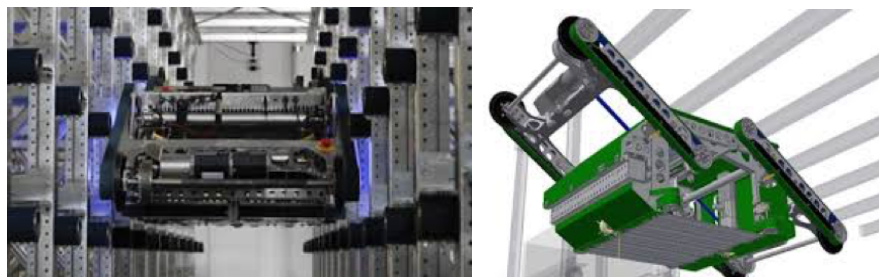
Afhankelijk van de toewijzing van de shuttles aan de niveaus, kunnen AVS/RS-systemen worden geclassificeerd als "tier-to-tier" AVS/RS-systemen en "tier-captive" AVS/RS-systemen (Zou et al., 2016). In de tier-to-tier-configuratie, de zogenaamde gepoolde shuttle-configuratie, kunnen de autonome shuttles met behulp van liften zich verplaatsen van het ene niveau naar het andere. Binnen een tier-captive-configuratie is de autonome shuttle bestemd voor één niveau (Epp et al., 2016). De shuttle is met andere woorden niveaugebonden en kan dat niveau niet verlaten. Liften worden hier ingezet om de eenheidsladingen te verplaatsen naar het bestemde niveau, waarna de shuttle gebonden aan dat niveau de transactie verder uitwerkt (Marchet et al., 2013). In industriële toepassingen wordt de tier-to-tier-configuratie meestal gebruikt bij de behandeling van palletladingen (Ekren et al., 2010). In een dergelijk systeem moet de verplaatsing van ladingen worden afgestemd op het soort shuttle om de opslag- en ophaaltransacties te kunnen voltooien. De tier-captive-configuratie is meer geschikt voor het afhandelen van kleine eenheidsladingen, zoals productbakken, met kleinere shuttles (Zou et al., 2016). Een AVS/RS met een tier-captive-configuratie is duurder omdat er meer shuttles worden gebruikt, maar biedt betere prestaties door het feit dat shuttle- en liftbewegingen onafhankelijk van elkaar zijn (Marchet et al., 2012).

De transacties die gebeuren binnen een magazijn zijn opslag- en ophaaltransacties. De opslagtransactie start als binnengekomen goederen gestockeerd moeten worden in het magazijn. De verwerkingsvolgorde voor een opslagtransactie omvat de volgende stappen. Vorkheftrucks deponeren pallets van binnenkomende vrachtwagens op een verzamelplaats (Heragu et al., 2011). Daar wacht een opslagtransactie op een beschikbare shuttle. Een beschikbare shuttle staat

stil op zijn rustpunt. Wanneer een beschikbare shuttle aan een transactie wordt toegewezen, reist de shuttle met behulp van rails van zijn huidige locatie, oftewel zijn rustpunt, naar het LU-punt (laad- en lospunt). Bij het LU-punt laadt de shuttle de pallet, rijdt van het LU-punt naar de opslagplaats en lost daar de pallet (Roy et al., 2012). Als de aangewezen opslaglocatie zich op een ander niveau bevindt dan het eerste niveau, maakt de shuttle gebruik van een lift om dat niveau te bereiken. De opslaggangpaden en dwarsgangen, die loodrecht op elkaar staan, zijn voorzien van rails die de horizontale beweging van de autonome shuttle op elk niveau begeleiden (Heragu et al., 2011). Voor het verwerken van een ophaaltransactie wacht een transactie ook eerst op een beschikbare shuttle. Vervolgens rijdt de toegewezen shuttle van het rustpunt naar de ophaallocatie, laadt de pallet en rijdt naar het LU-punt om de pallet te lossen (Roy et al., 2012).

#### *Verticale en diagonale AVS/RS-systemen*

Naast het horizontale AVS/RS-systeem deden onlangs ook *de verticale en diagonale AVS/RS-systemen* hun intrede. In deze systemen kan één enkele robot onafhankelijk van andere robots door het magazijn bewegen om items tussen opslaglocaties en werkstations te transporteren en om goederen op te slaan of op te halen voor verzending. In tegenstelling tot horizontale AVS/RS-systemen wordt in verticale en diagonale AVS/RS-systemen geen gebruik gemaakt van liften voor verticaal transport. Autonome shuttles voeren zelf opslag- en ophaaltransacties uit. In een *diagonaal systeem* bewegen deze autonome shuttles, robots genoemd in deze systemen, onafhankelijk van elkaar in zowel horizontale als diagonale richting binnen het magazijn. Een voorbeeld van het diagonaal systeem is de klimrobot Rack Racer (zie Figuur 17). In een *verticaal systeem* bewegen de robots zich horizontaal en verticaal binnen de rekstructuur. Perfect Pick® is een voorbeeld van een verticaal systeem dat de iBot® (zie Figuur 18) als robot gebruikt (Azadeh et al., 2017).



*Figuur 17: Rack Racer: diagonaal AVS/RS-systeem*



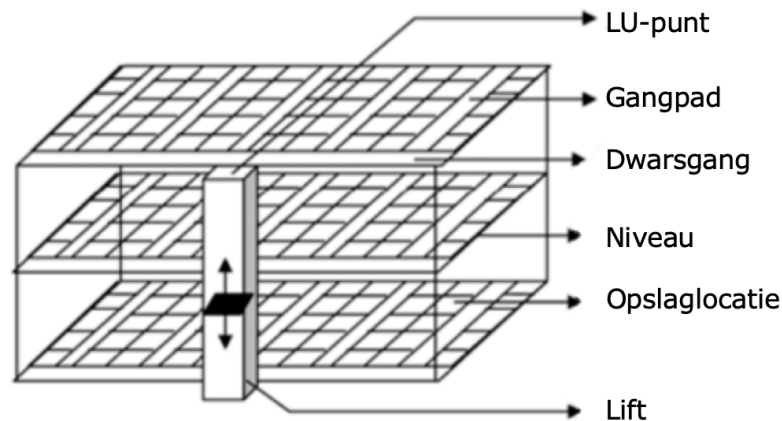
*Figuur 18: iBot Perfect Pick: Verticaal AVS/RS-systeem*

### 3.1.3 Werking AVS/RS-systeem

#### Horizontale AVS/RS-systemen

AVS/RS-systemen worden gebruikt om opslag- en ophaaltransacties van eenheidsladingen te verwerken, vooral in opslagruimtes met een hoge dichtheid aan goederen. De belangrijkste onderdelen van een *horizontaal AVS/RS-systeem* zijn een vloot van autonome shuttles, lift(en) en niveaus met opslagrekken (Ekren, 2011). Deze componenten worden beschreven en geïllustreerd in onderstaande Figuren 19, 20, 21.

(1) Niveaus: een niveau is een verzameling van opslaglocaties met elk een vaste afmeting (rack area). Het bestaat uit een set gangen met opslaglocaties (bays) aan beide zijden van het gangpad. Alle gangen zijn met elkaar verbonden door een dwarsgang die loodrecht op het gangpad loopt. Het laad/lospunt (LU-punt) bevindt zich in het midden van de dwarsgang (Kumar et al., 2013). Figuur 19 toont een schematische voorstelling van een AVS/RS-systeem met meerdere niveaus.



*Figuur 19: Een schematische weergave van horizontaal AVS/RS met meerdere niveaus.*

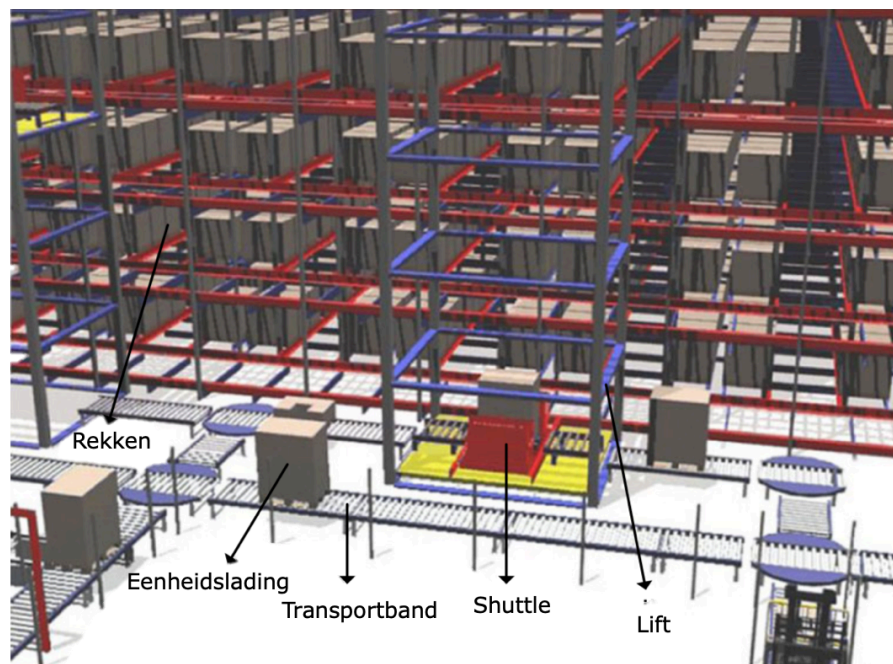
(2) Autonome shuttles (AV's): de AV's zorgen voor horizontale bewegingen binnen een niveau (langs de X- en Y-as) door gebruik te maken van rails die door het hele stellingbereik lopen. De shuttles rijden langs een gangpad met behulp van rails en bewegen tussen gangpaden met behulp van de dwarsgang (Kumar et al., 2013). Figuur 20 toont hoe deze autonome shuttles eruit zien.



*Figuur 20: De autonome shuttles in een horizontaal AVS/RS-systeem*



(3) Liften: een lift wordt gebruikt voor de verticale beweging van shuttles/pallets tussen de niveaus (verticale beweging langs de Z-as). Figuur 21 toont waar de liften zich situeren in een AVS/RS-systeem en de verticale beweging mogelijk maken (Kumar et al., 2013).



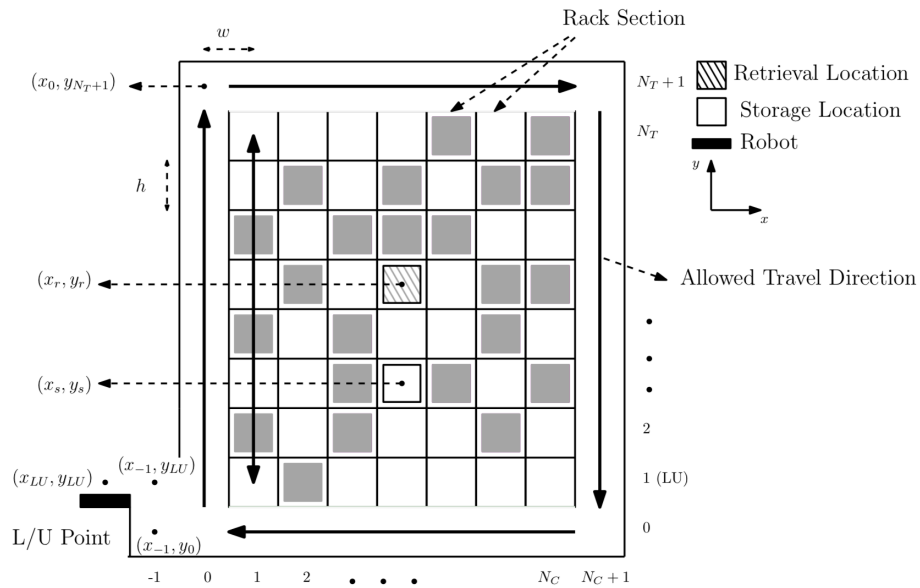
*Figuur 21: Illustratie van een liftstructuur binnen een horizontaal AVS/RS-systeem (Ekren, 2011)*

Magazijnen die gebruik maken van AVS/RS-systemen zijn meestal in de hoogte gebouwd en verwerken *eenheidsladingen* (bijvoorbeeld pallets, bakken) (Ekren, 2011). De magazijnen zijn in de hoogte gebouwd omdat de kosten van de rekken een aanzienlijke invloed hebben op de totale investering (doorgaans meer dan 25% van de totale investering). Hoe hoger de rekken gebouwd worden, hoe minder ruimte er nodig is om de goederen te stockeren en hoe minder extra rekken er bijgeplaatst moeten worden en dus dalen hierdoor de kosten (Marchet et al., 2013). De magazijnen zijn verdeeld in verschillende gangen, met aan beide zijden opslagrekken. In deze opslagrekken liggen de eenheidsladingen opgeslagen om door de autonome shuttles (AV's) in horizontale richting gepickt te worden. Deze horizontale picking gebeurt binnen één niveau. Uiteraard bestaat een magazijn uit opslagrekken met verschillende niveaus. Om een lading die van boven in het rek opgeslagen ligt naar beneden te transporteren voor verzending naar de klant, worden liften gebruikt. Dit noemt men het verticaal transport binnen de AVS/RS-systemen (Ekren, 2011). Doorgaans wordt de doorvoercapaciteit van het horizontaal AVS/RS-systeem beperkt door het aantal liften in dit systeem (Azahdeh et al., 2016).

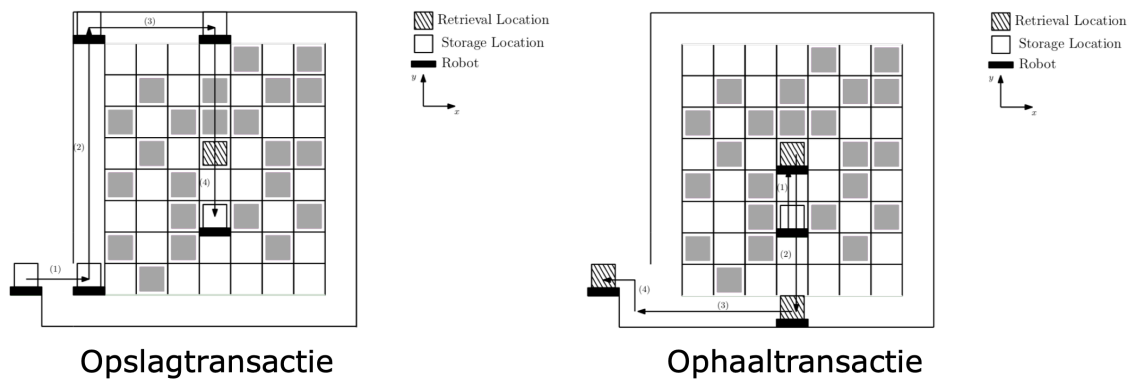
#### *Verticale AVS/RS-systemen*

Het *verticale AVS/RS-systeem* bestaat uit verschillende gangen. Elke gang bestaat uit twee opslagrekken, gescheiden door een gang waarin de autonome robots kunnen bewegen. Elke robot heeft toegang tot elke opslaglocatie binnen het gangpad door zich achtereenvolgens horizontaal en verticaal te bewegen. Het laad- en looppunt (LU-punt) bevindt zich aan beide uiteinden van elk gangpad. Op de tussenverdieping kunnen extra LU-punten worden opgenomen om de

pickcapaciteit te vergroten. Technisch gezien hebben de robots de mogelijkheid om zich tussen de gangen te verplaatsen, maar in de huidige implementaties van het verticale systeem zijn de robots echter toegewezen aan één gang (Azahdeh et al., 2016).



Figuur 22: Zijaanzicht van één gang in een verticaal AVS/RS-systeem (Azahdeh et al., 2016)



Figuur 23: Opslag- en ophaaltransacties in verticale AVS/RS-systemen (met DC-cyclus) (Azahdeh et al., 2016)

Figuur 22 toont een zijaanzicht van een gang van het verticale systeem met één LU-punt. Elke gang is verdeeld in meerdere kolommen, waarvan elke kolom een rekdeel vertegenwoordigt. Robots volgen een voorgedefinieerd pad om zich te verplaatsen naar elke opslaglocatie in het gangpad. De buitenste lus is unidirectioneel waardoor de robots slechts in één richting bewegen, elk rekdeel daarentegen is bidirectioneel. De robots kunnen zich hier in beide richtingen verplaatsen. Telkens een order wordt geplaatst door een klant, gebeurt er een nieuwe aanvraag voor het ophalen van een product. Er wordt met andere woorden een ophaaltransactie aangevraagd. Het controlesysteem stuurt de robot van zijn rustplaats naar de gevraagde locatie en volgt daarbij de toegestane richting. Hij haalt de bak met het bestelde product op en transporteert deze naar het LU-punt. Een gelijkaardig proces wordt gevolgd om een bak terug op te slaan in de opslagplaats. De rijpaden die overeenkomen met de verwerkingsvolgorde van de

opslag- en opvraagtransacties in een DC-cyclus (dit wil zeggen dat de robot eerst de bak met de artikelen opslaat en vervolgens de nieuwe bak met artikelen voor de huidige aanvraag ophaalt) zijn weergegeven in respectievelijk Figuur 23 (Azadeh et al., 2016).

### 3.1.4 Verschillen horizontale en verticale AVS/RS-systemen

Het single-touch ophaalproces, waarbij slechts één robot nodig is om een transactie te voltooien, geeft het verticale systeem een voordeel op zijn horizontale, multi-touch tegenhanger als het gaat om flexibiliteit en aanpassing van de doorvoercapaciteit. In het verticale systeem kan het gewenste doorvoerniveau worden verkregen door alleen het juiste aantal robots te kiezen. In het horizontale systeem moet echter het aantal shuttles en het aantal liften worden aangepast om een bepaalde doorvoercapaciteit te bereiken. Bovendien vereist het toevoegen van extra liften een grote revisie van het systeem. Als één van de robots in het verticale systeem defect raakt, kan deze bovendien worden vervangen zonder dat dit gevolgen heeft voor de werking. Daarentegen kan het uitvallen van een uitwisselingspunt in het horizontale systeem leiden tot een uitschakeling van het systeem. Hoewel het verticale systeem flexibeler en betrouwbaarder lijkt dan het horizontale systeem, is het niet duidelijk welk systeem een hogere doorvoercapaciteit bereikt met dezelfde opslagcapaciteit en hetzelfde aantal robots (Azahdeh et al., 2016). De verticale en diagonale systemen lijken betrouwbaarder en flexibeler dan de horizontale systemen, maar er zijn onvoldoende studies uitgevoerd om hierover een oordeel te vellen. Er zijn wel veel studies die de prestaties van de horizontale systemen analyseren (Azahdeh et al., 2016). Het diagonale systeem daarentegen is nog niet bestudeerd, terwijl voor het verticale systeem slechts één onderzoek (Azadeh et al. 2016) werd gedaan (Azahdeh et al., 2017). Tabel 5 geeft de grootste verschillen weer tussen horizontale en verticale AVS/RS-systemen.

Tabel 5: De grootste verschillen tussen horizontale en verticale AVS/RS-systemen

Categorie	Horizontale AVS/RS-systeem	Verticale AVS/RS-systeem
<b>Fysieke inrichting</b>	Shuttles en liften als opslag- en ophaalsysteem: tot twee laad/losplaatsen per gang (voor elke laad/losplaats) is een speciale lift nodig)	Klimrobots als opslag- en ophaalsysteem: tot vier laad/losplaatsen per gang
<b>De paden waar de robots zich bewegen</b>	Horizontale paden op het spoor	Flexibele horizontale en verticale paden via sporen
<b>Het verplaatsen van ladingen</b>	Ladingen gaan een niveau in en uit vanaf één punt van het gangpad (LU-punt)	Ladingen gaan het rekgedeelte van een gang in vanaf de bovenkant en verlaten de bodem (of omgekeerd)
<b>Doorvoersnelheid</b>	Bepaald door het aantal shuttles en liften	Bepaald door het aantal robots

### **3.2 Planningsbeslissingen in AVS/RS-magazijnen**

Voor beslissingen die gemaakt moeten worden bij het plannen en ontwerpen van een magazijn met een AVS/RS-systeem kunnen drie niveaus van besluitvorming worden onderscheiden: lange termijn (strategisch), middellange termijn (tactisch) en korte termijn (operationeel). In onderzoek rond AVS/RS-systemen wordt er vooral de nadruk gelegd tussen het verschil op lange termijn en op korte termijn.

Bij de langetermijnplanning staan de beslissingen in het teken van de selectie en optimalisatie van het ontwerp van het systeem. Een eerste keuze die gemaakt moet worden is de keuze van het systeem: horizontaal, verticaal of diagonaal. Verder is op dit niveau het hoofddoel het maximaliseren van de doorvoer- en opslagcapaciteit. De doelstellingen worden beïnvloed door verschillende beslissingsvariabelen, zoals de fysieke lay-out-configuratie (bijvoorbeeld het aantal gangen, de diepte/breedteverhouding (D/W) van elke gang en het aantal niveaus), het aantal shuttles en liften en de locatie van de laad- en lospunten (LU-punten). In dit stadium ligt de nadruk op de beslissingen die moeilijk terug te draaien zijn als het systeem eenmaal geïnstalleerd is (Roy et al., 2012).

De besluitvorming op korte termijn richt zich op de operationele planning en controle. Enkele van de belangrijkste doelstellingen zijn het minimaliseren van de doorlooptijd, de wachttijd, de reactietijd en de hoeveelheid middelen. Beslissingen omvatten het toewijzingsbeleid voor shuttles, de blokkeringsprotocollen, de keuze van de rustplaats voor de shuttles, wat het selecteren van de locatie waar een shuttle zonder job wordt geparkeerd inhoudt (Azadeh et al., 2017), de toewijzing van shuttles aan bepaalde zones, type commando-cycli (enkel of dubbel), het opslagbeleid en het beleid voor het plannen van transacties (Roy et al., 2012)

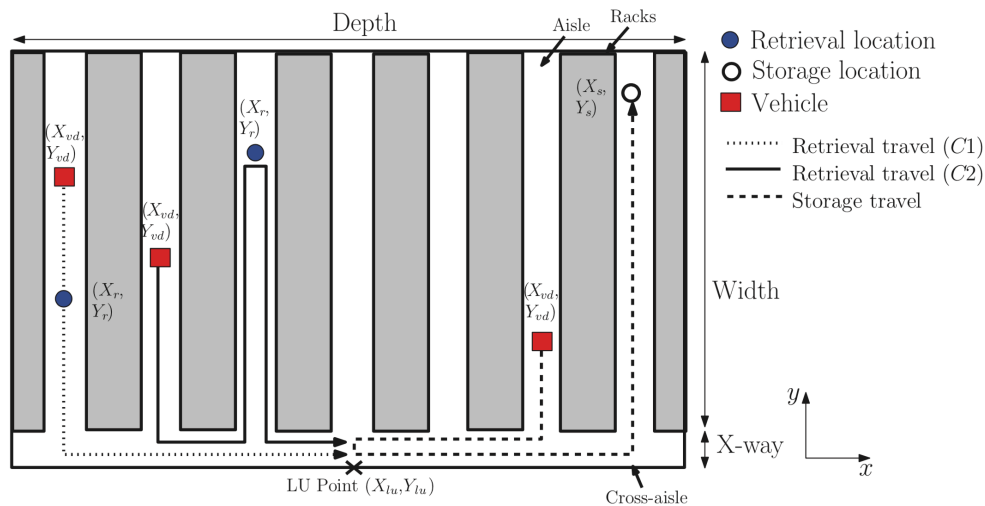
De doelstellingen voor een AVS/RS-systeem zijn enerzijds het maximaliseren van de doorvoercapaciteit (het aantal verwerkte transacties per tijdseenheid) en anderzijds het verbeteren van de responsiviteit (het minimaliseren van de verwachte transactietijd voor het verwerken van het ophaal- en opslagtransacties). De transactiecyclustijd is samengesteld uit de gemiddelde wachttijd voor het verkrijgen van een beschikbare shuttle, de reistijden in het gangpad en de dwarsgangen van een niveau, de wachttijd voor het gebruik van de lift en de storingsvertragingen van de shuttle (Kumar et al., 2013). De twee belangrijke criteria in het AVS/RS-ontwerp zijn dus de doorvoercapaciteit en transactiecyclustijd. Deze criteria worden beïnvloed door zowel strategische als operationele beslissingen (Roy et al., 2012).

Hieronder wordt dieper ingegaan op de verschillende operationele planningsbeslissingen in een horizontaal AVS/RS-systeem. In Sectie 3.2.1 wordt de keuze van de rustplaats van de shuttle uitgelegd. Hierna wordt in Sectie 3.2.2 toegespitst op het toewijzingsbeleid van de shuttles. Het implementeren van zones om shuttles toe te wijzen binnen een AVS/RS-systeem wordt onderzocht in Sectie 3.2.3, waarna de planningsregel van transacties in Sectie 3.2.4 wordt geanalyseerd. Verder wordt in Sectie 3.2.5 de verwerking van de transacties onderzocht en wordt in Sectie 3.2.6 dieper ingegaan op het opslagbeleid. Ten slotte wordt in Sectie 3.2.7 het type commando-cycli besproken en in Sectie 3.2.8 het blokkeringsbeleid. Omdat naar operationele

planningsproblemen in verticale AVS/RS-systemen nog weinig onderzoek gedaan is, worden deze planningsbeslissingen besproken in Sectie 3.2.9.

### 3.2.1 Keuze van de rustplaats van de shuttle

De eerste operationele planningsbeslissing die besproken wordt, is de keuze van de rustplaats van de shuttles, of het dwell-point policy. Het rustpunt van een shuttle geeft de plaats aan waar de autonome shuttle stilstaat of verblijft na het verwerken van een ophaal- of opslagtransactie. De keuze van een rustpunt heeft een belangrijke invloed op de reistijd van de volgende te verwerken transactie. Als een shuttle bijvoorbeeld stilstaat op het punt waar de transactie wordt afgerond (POSC, Point Of Service Completion) en de volgende transactie bestaat uit het ophalen van een pallet uit hetzelfde gangpad, dan is de beslissing over het POSC als rustpunt een goede keuze. Als de volgende transactie echter een opslagtransactie is, dan zou het laad- en lospunt (LU-punt) een betere keuze zijn geweest omdat de pallet (die moet worden opgeslagen) op het LU-punt beschikbaar is (Roy et al., 2015). De mogelijke rustpunten, LU-punt, POSC en het POLL (Point of Lift Location) worden aangehaald en hieronder uitgelegd.



Figuur 24: Beschrijving van een AVS/RS-systeem (bovenaanzicht van één niveau) (Roy et al., 2012)

#### LU-punt (laad- en lospunt) kiezen als rustpunt

Nu kiezen we als rustpunt het LU-punt, oftewel het laad- en lospunt. In Figuur 24 wordt de verwerkingsvolgorde van een opslag- en ophaaltransactie met het LU-punt als rustpunt geïllustreerd. Als een pallet opgeslagen moet worden zijn er twee opties bij aankomst in het magazijn: (1) pallet vindt een stilstaande shuttle bij aankomst en (2) pallet vindt geen stilstaande shuttle bij aankomst. Als een pallet een stilstaande shuttle vindt, wordt de shuttle toegewezen aan de opslagtransactie. De shuttle begint zijn reis vanaf het beginpunt  $(X_{vd}, Y_{vd})$ , kiest de pallet en rijdt langs de dwarsgang en het gangpad om de opslaglocatie te bereiken  $(X_s, Y_s)$ . Als een pallet voor opslag bij aankomst geen shuttle vindt, wacht de pallet op het LU-punt om door een shuttle te worden opgehaald. Zodra een vrije shuttle beschikbaar is, claimt de transactie de shuttle en rijdt de shuttle naar het LU-punt  $(X_{lu}, Y_{lu})$ . Vervolgens pikt de shuttle de pallet op en rijdt langs de dwarsgang en het gangpad om de opslaglocatie te bereiken  $(X_s, Y_s)$ . De shuttle lost

de pallet op de opslagplaats en keert terug naar het rustpunt, het LU-punt in dit geval. Afhankelijk van de status van de shuttle zijn er ook twee mogelijkheden om een ophaaltransactie te verwerken (Roy et al., 2015).

Door het LU-punt te kiezen als rustpunt kwam er ook aan het licht dat de percentuele daling in transactiecyclustijden, dubbel zo hoog lag bij de opslagtransacties ten opzichte van de ophaaltransacties. Deze daling is te wijten aan het feit dat opslagtransacties telkens starten aan het LU-punt. Omdat dit het rustpunt is van de shuttles, zijn er vanaf dit punt meestal ook meteen shuttles beschikbaar, waardoor de wachttijd voor een beschikbare shuttle meteen daalt, wat resulteert in een verlaging van de transactiecyclustijd: voor opslagtransacties percentueel tussen 2 en 16%, voor ophaaltransacties tussen 1 en 8% (Roy et al., 2015).

#### *POSC (Point Of Service Completion) kiezen als rustpunt*

Nu kiezen we POSC als rustpunt en ook hier worden de reisbewegingen voor het verwerken van opslag- en ophaaltransacties onderzocht. In het POSC-rustpuntbeleid verblijft de shuttle op het punt waar de transactie wordt afgerond (POSC). Voor een opslagtransactie is dit punt een opslaglocatie binnen de stellingstructuur. Voor een ophaaltransactie is dit het punt waar de eenheidslading afgeleverd wordt, wat het LU-punt is. De verwerkingsvolgorde voor opslag- en ophaaltransacties met POSC en een LU-puntbeleid zijn identiek voor het geval dat de transactie bij aankomst geen stilstaande shuttle vindt. Als voor de transactie bij aankomst een shuttle beschikbaar is, kunnen de verwerkingsvolgordes voor opslag- en ophaaltransacties met POSC en een LU-puntbeleid bij de eerste reisbeweging verschillen. Bij een POSC-punt kan de shuttle na de verwerking van een opslagtransactie de beweging starten vanaf een interne stelling (en niet vanaf een LU-punt) (Roy et al., 2015).

#### *POLL (Point Of Lift Location) als rustpunt*

Omdat de shuttles gebruik maken van liften voor verticale verplaatsing, kan het voordelig zijn om de shuttles in de buurt van de liftlocatie te plaatsen. Uit onderzoek waar vier verschillende planningsbeslissingen geanalyseerd worden, blijkt het POLL als rustpunt, in combinatie met 3 andere planningsbeslissingen het meest optimaal op basis van de prestatie-indicatoren transactiecyclustijd en bezettingsgraad per shuttle en lift (Ekren et al., 2010). Het POLL kan dus voor bepaalde magazijnen een ideaal rustpunt zijn. Deze combinatie van planningsbeslissingen wordt verder aangehaald in Sectie 3.3.

### **3.2.2 Regels voor shuttletoewijzing aan transacties**

In het onderzoek van Roy et al. (2012) worden twee manieren van shuttletoewijzing onderzocht, het willekeurige shuttletoewijzingsbeleid en het preferentiële shuttletoewijzingsbeleid. Wanneer een shuttle willekeurig wordt toegewezen uit de pool van stilstaande shuttles om een opslag- of ophaaltransactie te verwerken, wordt dit het *willekeurige shuttletoewijzingsbeleid* genoemd. In het *preferentiële shuttletoewijzingsbeleid* wordt de voorkeur gegeven aan een shuttle van bepaalde klasse voor het verwerken van ophaaltransacties, terwijl een shuttle van een andere klasse de voorkeur krijgt voor het verwerken van opslagtransacties (Roy et al., 2012).

Wanneer het systeem werkt volgens het POSC-rustpuntbeleid, bevinden de shuttles zich na het voltooiën van de transacties ofwel op het LU-punt (bij een ophaaltransactie) ofwel bij een opslaglocatie binnen de stellingstructuur (bij een opslagtransactie). Volgens de willekeurige toewijzing van shuttles is het even waarschijnlijk dat elk beschikbare stilstaande shuttle, ongeacht de locatie van het huidige rustpunt, wordt gekozen om de volgende transactie te verwerken. Deze regel is mogelijk geen efficiënte keuze, omdat een shuttle die zich binnen de stellingstructuur bevindt, kan worden geselecteerd om een opslagtransactie te verwerken wanneer er ook een shuttle met een LU-punt beschikbaar is. Die shuttle op het LU-punt zou normaliter een efficiëntere keuze zijn voor een opslagtransactie, aangezien deze transactie start aan het LU-punt. Op dezelfde manier kan een shuttle aan het LU-punt worden geselecteerd om een ophaaltransactie te verwerken, wanneer een shuttle binnen de stellingstructuur die zich dicht bij de ophaallocatie bevindt, ook beschikbaar is. Daarom wordt in het kader van de shuttletoewijzing de voorkeur gegeven aan het preferentiële shuttletoewijzingsbeleid. Dit beleid zorgt ervoor dat een shuttle binnen de stellingstructuur de voorkeur krijgt om een ophaaltransactie uit te voeren en een shuttle aan het LU-punt de voorkeur krijgt om een opslagtransactie te vervullen (Roy et al., 2012).

Het preferentiële toewijzingsbeleid lijkt efficiënter omdat er gekozen kan worden welke shuttle welke transactie uitvoert. Toch blijkt uit onderzoeksresultaten dat systemen die gebruik maken van een preferentiële toewijzing van shuttles marginaal hogere gemiddelde ophaalcyclustijden hebben dan systemen die gebruik maken van het willekeurige toewijzingsbeleid. De opslagcyclustijd zou wel lager liggen bij de preferentiële toewijzing. Het verschil in verwachte cyclustijden tussen beide beleidslijnen is echter verwaarloosbaar. Bovendien worden de regels voor shuttletoewijzing niet uitgeoefend wanneer de shuttles bezet zijn en dus al een transactie uitoefenen. Het verschil in transactiecyclustijd neemt af met een toename van de bezettingsgraad (Roy et al., 2012).

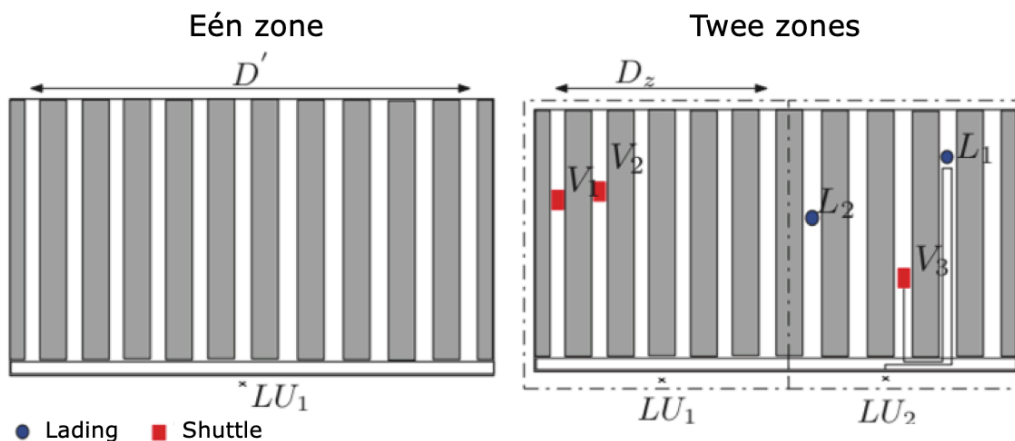
### **3.2.3 Shuttles toewijzen aan zones**

#### *Horizontale zones*

De horizontale reistijd van de shuttles binnen een niveau is vaak een belangrijk onderdeel van de cyclustijd. Om de responsiviteit van het systeem te verbeteren, dient deze cyclustijd zo kort mogelijk te zijn. Een manier om de cyclustijd in een AVS/RS-systeem te reduceren is het verdelen van het niveau langs de gangpaden in zones en het toewijzen van shuttle(s) aan elke zone. Elke zone bestaat uit een set gangpaden die een gemeenschappelijk segment van de dwarsgang delen. Het LU-punt voor elke zone bevindt zich in het midden van het dwarsgeplaatste segment. Door het vormen van zones worden reistijdbesparingen gerealiseerd. Bij een opslagtransactie kan bijvoorbeeld de reistijd langs de x-as in de opslagcyclus door het vormen van zones worden gereduceerd. Wanneer shuttles echter binnen een zone worden opgesloten, kan een shuttle alleen transactieverzoeken (opslag- of ophaal) binnen zijn zone verwerken (Roy et al., 2012).

In het onderzoek van Roy et al. (2012) wordt het POSC als rustpunt gebruikt en worden shuttles willekeurig toegewezen. Figuur 25 toont een voorbeeld van een AVS/RS-systeem met één en twee zones. In een AVS/RS met zones wordt de afweging tussen vermindering van de rijafstand en shuttlepoolingseffecten belangrijk. Enerzijds kunnen door het vormen van twee zones de

horizontale reistijden verminderen, maar anderzijds verdwijnt het voordeel van een AVS/RS-systeem dat elke shuttle elke opslaglocatie kan bereiken in het magazijn. Toch kan het shuttlegebruik in verschillende zones onevenwichtig zijn, waarmee bedoeld wordt dat in de ene zone meer shuttles toegewezen worden dan in de andere zone, wat leidt tot langere cyclustijden in de zone waar minder shuttles aanwezig zijn. Dit wordt afgebeeld in Figuur 25, waar aan zone 1 twee shuttles toegewezen worden en aan zone 2 slechts één shuttle toegewezen wordt. Bovendien worden bij zones extra vaste kosten gemaakt door extra LU-punten (Roy et al., 2012).



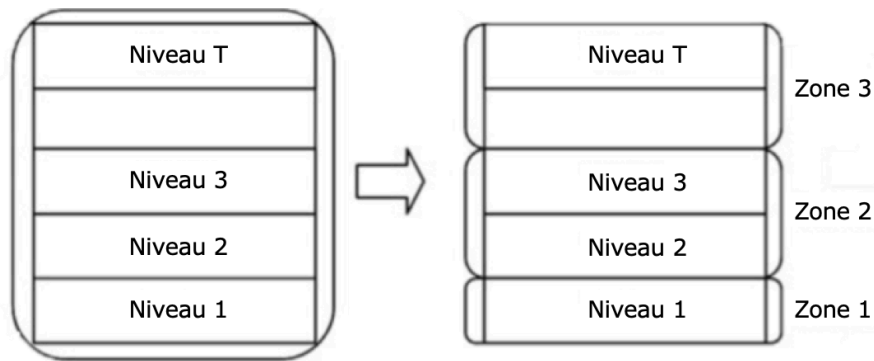
Figuur 25: Schematische voorstelling van een horizontale zonering

Onderzoek toont aan dat meerdere zones een vermindering van de reistijd langs het gangpad tweebrengt (Roy et al., 2012). Cyclustijden met twee gelijke zones blijken beter te presteren dan het systeem met één zone. Toch nemen naarmate het aantal zones toeneemt en de horizontale reistijden van de shuttles korter worden de prestaties van het systeem af, door de stijging van de transactiewachttijden als gevolg van de langere wachttijden voor shuttles. De wachttijd voor vrije shuttles neemt toe door het verlies van de shuttlepooling. De transactiecyclustijd voor vijf zones ligt aanzienlijk hoger dan voor twee zones en is dus minder efficiënt. Het analysemodel van Roy et al. (2012) kan cyclustijden verbeteren met 12-17%. Daarom wordt dit model gebruikt om het optimale aantal zones voor een bepaalde lay-out te bestuderen. Tot slot versterkt dit onderzoek ook de effectiviteit van een willekeurige shuttletoewijzingsregel (Roy et al., 2012).

#### Verticale zones

Hoewel horizontale zonering zorgt voor een vermindering van de horizontale reistijd, bestaat er nog steeds een trade-off tussen de horizontale reistijd en de wachttijden voor shuttles binnen één niveau. Onderzoek toonde aan dat twee horizontale zones vaak de meest optimale keuze zijn (Roy et al., 2012). Uiteraard moet het indelen van het magazijn in zones niet altijd in dezelfde richting gebeuren. Verder onderzoek werd gedaan om te zien of verticale zonering ook voordelig kan uitdraaien. Waar horizontale zonering zones vormt langs de gangpaden, vormt verticale zonering zones binnen de niveaus. Figuur 26 toont hoe deze verticale zonering eruit ziet (Kumar et al., 2013).





*Figuur 26: Verticale zonering van een tier-captive AVS/RS-systeem*

Zowel de prestaties van een magazijn met horizontale zonering als verticale zonering worden geanalyseerd in verder onderzoek. Er komt aan het licht dat een horizontale zonering met twee zones, zorgt voor een reductie van de ophaalcyclustijd van ongeveer 34% en een vermindering van de opslagcyclustijd met 37%. Als men hetzelfde AVS/RS-magazijn met dezelfde configuratieparameters verdeelt in 5 verticale zones, wordt een verdere vermindering van 10% in de ophaalcyclustijd zichtbaar. Voor de opslagcyclustijd wordt echter geen significant verschil gevonden. Verticale zonering vermindert echter wel de verwachte opslagcyclustijden bij hogere D/W-verhoudingen (Kumar et al., 2013).

In het algemeen is de zone-indeling van twee verticale zones (1, T-1) een efficiënte ontwerpkeuze voor een T-niveau systeem, waarbij T het aantal niveaus is, zowel voor het geval van configuraties met vijf als met zeven niveaus. De eerste zone bestaat dan uit het eerste niveau waaraan shuttles toegewezen worden en een tweede zone bestaat uit alle andere niveaus waar de voordelen van shuttlepooling wel nog gelden. Een optimale verticale zone-indeling kan de transactiecyclustijd tot 12% reduceren in vergelijking met de gepoolde shuttleconfiguratie, maar dit effect hangt samen met de D/W-verhouding van de rekken. Hoe hoger het D/W-ratio, hoe groter het effect op de transactiecyclustijd. Verder werd ook vastgesteld dat een horizontale zonering meer voordelen oplevert in cyclustijdreductie dan een verticale zonering (Kumar et al., 2013).

### **3.2.4 Planningsregel van de transacties**

Opslagtransacties in de magazijnen zijn meestal niet tijdskritisch. Hiermee wordt bedoeld dat het exacte tijdstip waarop ladingen worden opgeslagen niet van groot belang is op de prestaties van het systeem. Daarom worden opslagtransacties meestal bediend volgens het FCFS-principe (First Come, First Served). Omdat ophaaltransacties echter tijdgevoelig zijn, wordt sequencing belangrijk. Door de opslag- en ophaaltransacties efficiënt te sequencen kan de totale cyclustijd worden verbeterd. Twee soorten dienstregelingen van transacties worden onderzocht, enerzijds het FCFS-principe en anderzijds het SDT-principe (Shortest Destination Time) (Ekren et al., 2010). Het FCFS-principe, de meest bekende regel, kiest telkens de transactie die het eerste aankwam of die met andere woorden de vroegste aankomsttijd heeft. Het SDT-principe kiest de transactie die de kortste tijdspanne in beslag neemt (Yin & Rau, 2005).

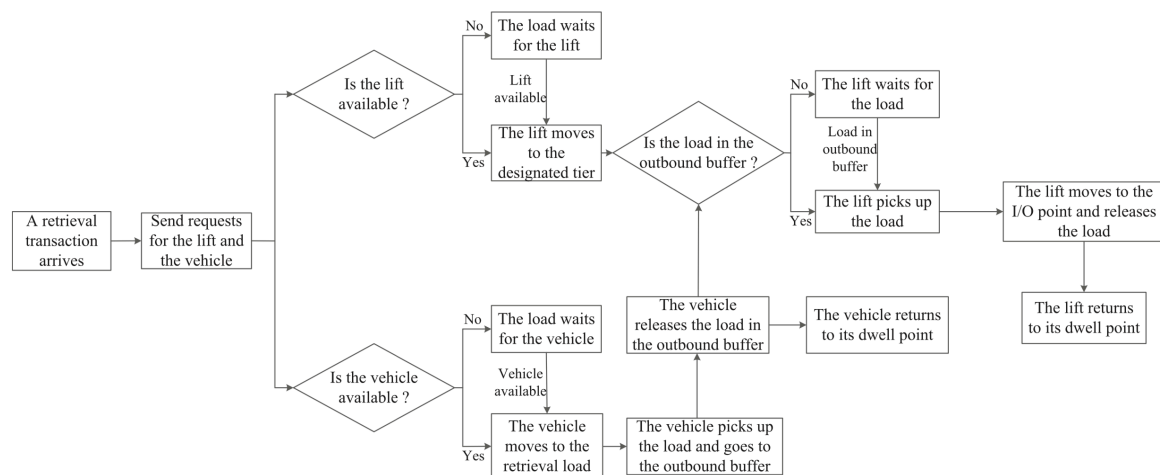
In een onderzoek (Ekren et al., 2010) worden vier verschillende planningsbeslissingen geanalyseerd om te kijken welke combinatie de beste prestatie neerzet op vlak van

transactiecyclustijd en de bezettingsgraad per shuttle en lift. Hieruit blijkt dat het SDT-principe in combinatie met 3 andere parameters het meest optimaal is (Ekren et al., 2010). Verdere uitleg over dit onderzoek en de relatie tussen deze planningsbeslissingen staat in Sectie 3.3.

### 3.2.5 Verwerking van de transacties

Om een opslag- of ophaaltransactie uit te voeren, heeft de transactie nood aan een lift of een shuttle. De manier waarop deze gevraagd worden kan verschillen. Zo bestaat er het sequentieel verwerkingsbeleid en het parallel verwerkingsbeleid. In het *sequentieel verwerkingsbeleid* vraagt een opslagtransactie eerst een lift en vervolgens, de shuttle, terwijl een ophaaltransactie de lift en de shuttle in omgekeerde volgorde vraagt. Bij een ophaaltransactie transporteert de shuttle de lading naar de uitgaande buffer en vraagt de transactie vervolgens om de lift. Voor een opslagtransactie transporteert de lift de inkomende lading van het LU-punt naar de inkomende buffer van het aangewezen niveau, en vervolgens vraagt de transactie naar een beschikbare shuttle (Zou et al., 2016).

Aangezien de shuttle in een tier-captive configuratie alleen kan bewegen op het aangewezen niveau, zal in een *parallel verwerkingsbeleid* waarbij de transacties de lift en de shuttle tegelijkertijd aanvragen, beter presteren. Bij een dergelijk beleid vervoert de shuttle bij een ophaaltransactie de op te halen lading naar de uitgaande buffer en ondertussen reist de lift naar het aangewezen niveau. Bij een opslagtransactie transporteert de lift de lading naar de inkomende buffer van het aangewezen niveau. Ondertussen verhuist de shuttle naar de inkomende buffer (Zou et al., 2016). Figuur 27 toont hoe het parallel verwerkingsbeleid bij een ophaaltransactie in zijn werk gaat.



Figuur 27: Schematische voorstelling van het ophaalproces van een tier-captive AVS/RS-systeem volgens het parallel verwerkingsbeleid (Zou et al., 2016)

Uit het onderzoek van Zou et al. (2016) bij een tier-captive AVS/RS-systeem voor enkel de ophaaltransacties blijkt dat het parallel verwerkingsbeleid in kleinschalige AVS/RS-systemen (als het aantal niveaus kleiner is dan 10) beter presteert dan het sequentiële verwerkingsbeleid. In een dergelijk systeem is de gemiddelde verbetering van de reactietijd van het systeem minstens 5,51%. Het voordeel van het parallel verwerkingsbeleid neemt af naarmate de rekhoogte en de ganglengte toenemen. In grote systemen, dat wil zeggen waar het aantal niveaus groter is dan

10 en de verhouding tussen de ganglengte en de rekhoogte groter is dan 7, kunnen we een kritisch punt vinden in de aankomstsnelheid van de ophaaltransactie. Wanneer de aankomstsnelheid van de ophaaltransactie minder is dan dit kritische niveau, moet het tier-captive AVS/RS-systeem het parallel verwerkingsbeleid volgen, in het tegenovergestelde geval moet het het sequentiële verwerkingsbeleid volgen (Zou et al., 2016).

Hoewel het misschien vreemd lijkt dat het sequentiële beleid beter presteert dan het parallel beleid voor grote systemen, kan het worden verklaard door de gezamenlijke verwerking en de wachttijden afzonderlijk te bekijken. Het parallel verwerkingsbeleid verkort de totale verwerkingstijd, omdat het de lift en de shuttle tegelijkertijd laat werken. Bij grote systemen met aanzienlijke aankomstsnelheden van ophaaltransacties verhoogt het parallel verwerkingsbeleid echter de wachttijd door een zwaardere werklust voor de lift of als de lift moet wachten op de ladingen (Zou et al., 2016).

Bij systemen met een lage stelling is de capaciteit van de lift zodanig groot dat de toename van de wachttijd wordt gedomineerd door de reductie van de totale verwerkingstijd. Het parallel verwerkingsbeleid presteert dus beter dan het sequentiële verwerkingsbeleid wat betreft de reactietijd van het systeem voor ophaaltransacties. In systemen met een hoog rek en waarbij de aankomstsnelheid van de ophaaltransactie groter dan het kritische punt (bepaald in het onderzoek van Zou et al., 2016), moeten de ladingen echter op alle niveaus wachten voor de gemeenschappelijke lift en hier kan de vermindering van de verwerkingstijd de toename van de wachttijd niet compenseren. Het parallel verwerkingsbeleid presteert dus beter dan het sequentiële verwerkingsbeleid wanneer de aankomstsnelheid van de ophaaltransactie kleiner is dan het kritische punt, en de situatie keert om wanneer de transactieaankomst groter is dan het kritische punt (Zou et al., 2016).

### **3.2.6 Opslagbeleid**

In de meeste AVS/RS-systemen wordt een *willekeurig opslagbeleid* gehanteerd vanwege de ruimte die bespaard wordt en de bijhorende lagere kapitaalkosten. Bij een willekeurig opslagbeleid worden binnenkomende ladingen toegewezen aan het dichtstbijzijnde lege opslaglocatie, waardoor de locatie van een specifieke lading een willekeurige variabele in de tijd wordt (Kuo et al., 2008). Dit beleid zorgt ervoor dat de bezettingsgraad van de ruimte wordt gemaximaliseerd door verschillende ladingen op verschillende tijdstippen op dezelfde adressen te laten aankomen. Hierdoor kan de opslaglocatie van één bepaald item op verschillende tijdstippen anders zijn (Ekren & Heragu, 2011). Het willekeurig opslagbeleid maximaliseert het gebruik van de opslagruimte in vergelijking met het *specifieke opslagbeleid*, omdat het verschillende items toestaat om een bepaalde opslaglocatie te bezetten (Ekren et al., 2010).

Het gebruik van *klasse-gebaseerde opslag* als alternatief voor willekeurige opslag kan echter ook een haalbare strategie zijn in AVS/RS-systemen. De langzame liftbewegingen binnen een AVS/RS-systeem kunnen een bottleneck vormen als men de transactiecyclustijden zo laag mogelijk wil houden. Vandaar dat klasse-gebaseerde opslag een oplossing kan zijn, omdat dit opslagsysteem een daling van verticale liftbewegingen kan teweegbrengen. De klassen worden gedefinieerd door de ladingen te groeperen op basis van hun omzetkarakteristieken. Een aantal studies van op

kranen gebaseerde AS/RS-systemen hebben aangetoond dat een klasse-gebaseerd opslagbeleid bijna net zo ruimtebesparend is als een willekeurig opslagbeleid, zelfs als er relatief kleine klassen worden gebruikt (Kuo et al., 2008). Vandaar dat er ook verder onderzoek gedaan werd naar de impact van klasse-gebaseerde opslag op de performantie van AVS/RS-systemen.

Door de ladingen met de hoogste omzetklasse die veel gepickt moeten worden en dus een groot deel van de totale systeemtransacties verklaren op de eerste niveau te plaatsen, kan de verticale beweging voor deze transacties geëlimineerd worden en worden transactiecyclustijden gemiddeld korter. Uit het onderzoek blijkt dat een op klassen gebaseerd opslagbeleid het effect van de hoge cyclustijd van verticale opslag kan verzachten, terwijl de ruimte-efficiëntie van de willekeurige opslag intact blijft (Kuo et al., 2008).

### **3.2.7 Type commando cycli**

Een transactie (opslag- of ophaal) binnen een AVS/RS-systeem kan op twee manieren georganiseerd worden, namelijk in een enkele commando-cyclus (SC) of in een dubbele commando-cyclus (DC). In een *SC-cyclus* voert de shuttle ofwel één enkele opslag- ofwel één enkele ophaaltransactie uit. De opslagcyclustijd is dan gelijk aan de som van de tijden om een lading op te halen bij het LU-punt, naar de opslaglocatie te rijden en de lading in het rek te plaatsen. De ophaalcyclustijd kan worden gedefinieerd als de som van de tijden om naar de opslaglocatie te rijden, een lading op te halen vanaf deze locatie en terug te keren naar het LU-punt. Als een AVS/RS-systeem in één cyclus zowel een opslag- als een ophaaltransactie uitvoert, noemen we dit *een DC-cyclus*. In dit geval wordt de cyclustijd gedefinieerd als de som van de tijden om de lading op te halen, naar de opslaglocatie te rijden en de lading op te slaan, de extra reistijd van de opslaglocatie naar de ophaallocatie en de tijd om de eenheidslading op te halen en naar het LU-punt te transporteren. Het is duidelijk dat de totale tijd voor het uitvoeren van alle opslag- en ophaaltransacties afneemt als er dubbele opdrachten worden uitgevoerd (Ekren et al., 2010).

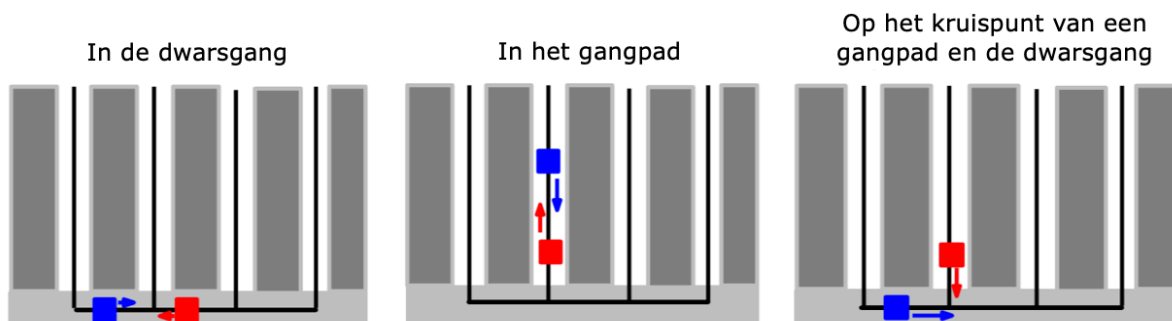
Net als traditionele AS/RS-systemen kunnen de shuttles in AVS/RS-systemen efficiënter werken door het combineren of 'interleaving' van opslag- en ophaaltransacties en zo de gemiddelde shuttletijd per transactie te verkorten (Malmberg, 2003). Interleaving wordt meestal uitgevoerd op een opportunistische basis waarbij een ophaaltransactie wordt gecombineerd met een opslagtransactie aan het begin van de cyclus wanneer één of meer opslag- en ophaaltransacties in de virtuele buffer wachten (Ekren et al., 2010). Opportunistische interleaving is een dynamisch proces waarbij willekeurige schommelingen in de transactieaankomsttijden meer mogelijkheden voor interleaving kunnen bieden. Naarmate er echter meer DC-cycli worden uitgevoerd, worden wachtrijen kleiner en worden SC-cycli waarschijnlijker (Malmberg, 2003).

### **3.2.8 Blokkeringsbeleid**

Omdat elke shuttle toegang heeft tot alle niveaus en opslaglocaties in een tier-to-tier-configuratie en tot elke opslaglocatie binnen één niveau in een tier-captive-configuratie, kunnen shuttles elkaar blokkeren als ze op hetzelfde moment in dezelfde gang, dwarsgang of kruispunt van de dwarsgang opereren en vertragingen veroorzaken. Deze blokkeringsvertragingen in de

gangpaden en dwarsgangen beïnvloeden aanzienlijk de doorvoercapaciteit en de transactiecyclustijden van het systeem (Roy et al., 2014).

Allereerst is het belangrijk om te definiëren wat nu net die blokkeringsvertragingen zijn. Deze vertragingen in een niveau kunnen ofwel in de dwarsgang ofwel in de gangpaden gebeuren wanneer meerdere shuttles dezelfde paden proberen te gebruiken. Wanneer shuttles interfereren, moeten ze wachten tot het pad naar de bestemming, bijvoorbeeld een specifieke opslaglocatie, is vrijgemaakt. Shuttleblokkeringen kunnen op drie locaties binnen een niveau optreden: (1) in de dwarsgang, (2) in een gangpad en (3) op het kruispunt van een gangpad en de dwarsgang. Shuttleblokkades in de dwarsgang gebeuren als een shuttle op het kruispunt rijdt en een andere shuttle in de tegenovergestelde richting probeert te rijden. Shuttleblokkering kan ook optreden in de gangpaden als een shuttle een transactie in het gangpad verwerkt en een andere shuttle hetzelfde gangpad ingaat voor een andere transactie. Een derde scenario van shuttleblokkering op het kruispunt van een gangpad en een dwarsgang treedt op als een shuttle wacht op de toegang tot de dwarsgang aan het einde van een gangpad en een andere shuttle dit gangpad probeert binnen te komen. Deze drie soorten shuttleblokkeringen staan afgebeeld in Figuur 28 (Roy et al., 2014). Deze blokkeringsvertragingen kunnen een aanzienlijke invloed hebben op de doorvoercapaciteit en de cyclustijden. Zo geven numerieke resultaten aan dat blokkeringsvertragingen kunnen bijdragen tot wel 10%-20% van de transactiecyclustijd. In het onderzoek van Roy et al. (2014) worden de effecten van blokkeringsvertragingen op de prestaties van een AVS/RS-systeem onderzocht en worden protocollen ontwikkeld om deze shuttleblokkeringen aan te pakken.



Figuur 28: Types van shuttleblokkeringen (Roy et al., 2014)

Om shuttleblokkeringen in de dwarsgang te vermijden werd een dwarsgangprotocol opgesteld. Hierbij rijden de shuttles tijdens de verwerking van de opslag- en ophaaltransacties van het LU-punt naar een gangpad met behulp van de rail over de dwarsgang en keren ze na de verwerking van de transactie terug naar het LU-punt. Shuttles hebben daardoor twee keer toegang nodig tot de dwarsgang voor de verwerking van elke transactie. Aangezien de dwarsgang alleen shuttles kan toestaan die in één richting rijden, om toegang te krijgen tot de dwarsgang, kan het zijn dat shuttles worden geblokkeerd en moeten wachten op het LU-punt of op het einde van een gangpad (EOA-punt, End Of an Aisle). Als meerdere shuttles op het LU-punt en EOA-punt wachten op het gebruik van de dwarsgang, wordt de blokkade op de dwarsgang afgehandeld met behulp van een eenvoudig schakelprotocol voor het gebruik van de dwarsgang. Shuttles op het LU-punt en op het EOA-punt krijgen afwisselend toegang tot de dwarsgang. Zo wordt de dwarsgang het ene moment

in beslag genomen door shuttles van het LU-punt die reizen naar de gangen en het andere moment door shuttles uit het EOA-punt die reizen naar het LU-punt. Deze regeling geldt totdat alle shuttles hun reis langs de dwarsgang hebben voltooid. Het protocol laat dus het gelijktijdige gebruik door meerdere shuttles in dezelfde richting toe op de dwarsgang (Roy et al., 2014).

Eenzelfde protocol werd ontwikkeld voor blokkeringen in de gangpaden. Het gangpadprotocol werkt als volgt: een shuttle die een transactie binnen eenzelfde gangpad voltooid, kan worden geblokkeerd door een andere shuttle die hetzelfde gangpad binnenrijdt. Er wordt aangenomen dat de eerste shuttle zich naar de laatst beschikbare locatie in het gangpad begeeft en daar wacht tot de laatste shuttle zijn transactie in dat gangpad heeft voltooid. Merk op dat volgens dit protocol een shuttle tijdens de transactie binnen een gangpad meerdere keren kan worden geblokkeerd als andere shuttles dit gangpad betreden voordat de eerste shuttle zijn gangpadtransactie voltooid (Roy et al., 2014).

Voor een blokkering op de kruising van de dwarsgang en het gangpad werd ook een protocol uitgewerkt. Het intersectieprotocol gaat als volgt: een shuttle wacht op toegang over de dwarsgang nadat het zijn transactie binnen een gangpad heeft voltooid. Deze shuttle kan worden geblokkeerd op het kruispunt als een andere shuttle hetzelfde gangpad probeert binnen te komen. Om te voorkomen dat de shuttle net op het kruispunt alles blokkeert, verlaten de shuttles na voltooiing van de transactie het desbetreffende gangpad en wachten ze in het rek voor het gangpad om toegang te krijgen tot de dwarsgang. Onderzoek biedt ook verschillende inzichten met betrekking tot het effect van ontwerpparameters zoals het aantal voertuigen, aantal opslaglocaties, en D/W-verhouding op blokkeringsvertragingen en cyclustijden (Roy et al., 2014). Deze worden toegelicht in Sectie 3.3.

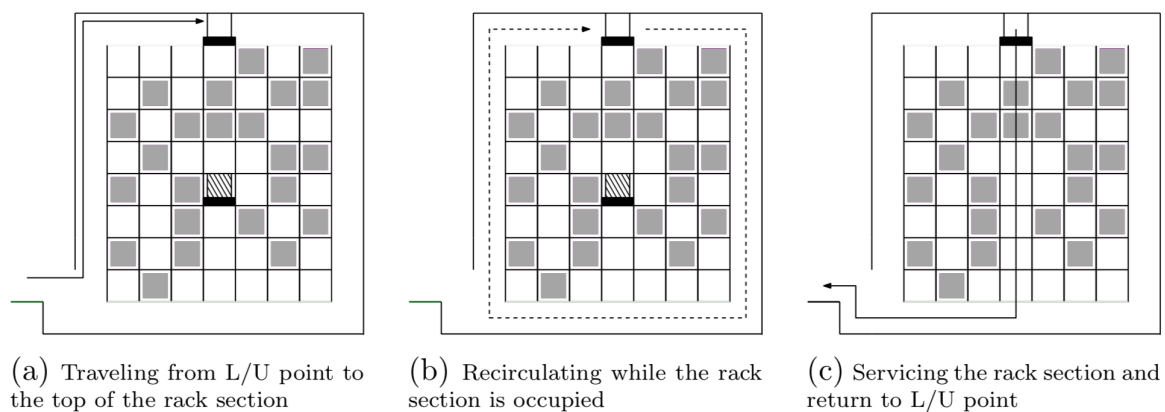
### **3.2.9 Operationele planningsbeslissingen in verticale AVS/RS-systemen**

Het verticale AVS/RS-systeem is een nieuw, op robots gebaseerd systeem dat de liften voor verticaal transport overbodig maakt, omdat robots in dit systeem de mogelijkheid hebben om onafhankelijk horizontaal én verticaal te bewegen en toegang krijgen tot alle opslaglocaties binnen het magazijn. Omdat het vrij nieuw is, werd er nog maar weinig onderzoek naar gedaan. Azahdeh et al. (2016) onderzochten wel al enkele planningsbeslissingen en vergeleken de operationele prestaties en de kosten van horizontale en verticale systemen. Hoewel deze planningsbeslissingen grotendeels strategisch en tactisch van aard zijn, werd ook het blokkeringsbeleid onderzocht.

De doorvoercapaciteit van het verticale systeem is afhankelijk van verschillende strategische keuzes, met name de configuratie van de lay-out en het aantal robots. Hoewel het verhogen van het aantal robots de doorvoercapaciteit van het systeem verhoogt, kan dit tegelijkertijd leiden tot meer blokkeringsvertragingen, waardoor de doorvoercapaciteit mogelijk afneemt. Daarom is inzicht in het effect van blokkerend en matigend beleid op de prestaties cruciaal, vooral in de conceptuele ontwerpfase (Azahdeh et al., 2016).

Om te voorkomen dat het systeem vastloopt, gaan we ervan uit dat er op een bepaald moment slechts één robot per reksegment is toegestaan. Als een andere robot een bezet reksegment wil betreden, moet hij buiten in het buitenste pad wachten, omdat er in een reksegment geen bufferlocatie is voor de wachtende robots om in de rij te gaan staan. Het verhogen van het aantal

robots kan dus mogelijk leiden tot opstoppingen en blokkades. We noemen het beleid waarbij de geblokkeerde robot boven op de reksectie wacht het *WOS-beleid*. Het nadeel van dit beleid is dat de wachtende robot andere robots kan blokkeren die toegang willen tot een ander reksegment, wat een negatieve invloed heeft op de prestaties van het systeem. Daarom stellen we een ander wachtbeleid voor. In dit beleid, *het REC-beleid*, controleert de robot eerst de status van het bestemmingsdeel van het rek en als het bezet is, circuleert de robot in het buitenste pad rond de reksecties. Na het voltooiën van een lus controleert hij opnieuw de status van het reksegment. Als het reksegment niet meer bezet is, claimt de robot deze. In het andere geval blijft hij recirculeren tot het rek beschikbaar is. Ter verduidelijking staat het REC-beleid afgebeeld in Figuur 29 (Azahdeh et al., 2016).



*Figuur 29: REC-blokkeringsbeleid*

Het REC-beleid kan leiden tot een lagere doorvoercapaciteit, vooral wanneer de recirculatielijd lang is en robots meer energie verbruiken. Door gebruik te maken van dit beleid zijn we er echter zeker van dat de robots elkaar niet blokkeren in afwachting van het leeglopen van het reksegment, wat kan resulteren in een hogere doorvoercapaciteit voor een groot aantal robots. In het onderzoek wordt het recirculatie (REC) blokkeringsbeleid voorgesteld in plaats van het afwachterende (WOS) beleid en hieruit blijkt dat het REC-beleid het WOS-beleid domineert als het aantal robots in het systeem hoog is (Azahdeh et al., 2017). Bij een systeem met weinig robots, wordt vastgesteld dat het WOS-beleid een klein voordeel heeft. Het verhogen van het aantal robots resulteert echter in een sterke daling van de systeemoorvoer, die kan worden verzacht door de invoering van het REC-beleid (Azahdeh et al., 2016).

### **3.3 Relaties tussen verschillende planningsbeslissingen in een AVS/RS-systeem**

Hoewel verschillende planningsbeslissingen onderzocht worden, zoals de strategische diepte/breedte (D/W)-verhoudingbeslissing van de rekken en de operationele beslissingen om shuttles toe te wijzen aan zones en ook de regels voor shuttletoewijzing, worden relaties tussen deze beslissingen niet onderzocht. Er komt wel aan het licht dat de verschillende planningsbeslissingen een invloed hebben op de transactiecyclus tijden, maar verbanden tussen de beslissingen werden noch onderzocht noch gevonden (Roy et al., 2012).

Effecten van shuttleblokkages worden geanalyseerd en hier worden relaties gevonden tussen deze blokkeringsvertragingen en strategische en tactische planningsbeslissingen die te maken hebben met verschillende niveauconfiguraties (aantal opslaglocaties, diepte/breedte-verhouding, aantal shuttles, shuttlebezettingsgraad). Zoals verwacht neemt het percentage blokkeringsvertragingen toe met het aantal shuttles in het systeem. Het percentage blokkeringsvertragingen stijgt met 5% voor 3 shuttles en zelfs met 20% voor 10 shuttles (Roy et al., 2016). Het effect van de blokkering op transactiecyclustijden neemt echter af naarmate het shuttlegebruik toeneemt. Enerzijds zal het gemiddelde percentage van blokkeringen dalen wanneer het shuttlegebruik toeneemt. Anderzijds zullen er hierdoor ook meer wachttijden gegenereerd worden omdat er minder beschikbare shuttles zijn. Omdat de stijging van de wachttijden voor beschikbare shuttles groter is dan de daling van aantal blokkeringen, zal de transactiecyclustijd uiteindelijk stijgen, waardoor het effect verdwijnt. Studies suggereren ook dat het aantal opslaglocaties geen significante invloed heeft op de blokkeringsvertragingen, maar de niveauconfiguratie (D/W-verhouding) heeft wel invloed op de omvang en het type van de blokkerende effecten die in een systeem worden waargenomen (Roy et al., 2014). Resultaten tonen ook aan dat het effect van de blokkering meer uitgesproken is bij de dwarsgangen dan bij de gangpaden. Daarom ondervinden niveaus met een grotere D/W-verhouding grotere vertragingen als gevolg van de blokkering (Roy et al., 2016).

Zowel de operationele beslissing van de keuze van het rustpunt van de shuttle, als de strategische keuze over de locatie van de dwarsgang worden onderzocht en hier blijkt dat het LU-punt een betere keuze is dan het POSC-punt voor de rustplaats van de shuttle op vlak van transactiecyclustijden. Verder werden ook relaties gevonden tussen de keuze van het rustpunt en andere planningsbeslissingen. Zo kwam aan het licht dat een hogere shuttlebezettingsgraad de voordelen van het LU-punt als rustpunt op de prestaties van het systeem doet dalen. Dit is omdat hoe hoger de bezettingsgraad, hoe meer de shuttles operationeel actief zijn, hoe minder tijd er voor de shuttles is om zich te begeven naar het rustpunt. Bij een zeer hoge bezettingsgraad, hebben de shuttles zelfs niet de mogelijkheid om te rusten. Vandaar dat het effect van het rustpuntbeleid niet significant is (Roy et al., 2015).

Verder werd ook duidelijk dat de percentuele daling in transactiecyclustijden door het LU-punt te kiezen als rustpunt, dubbel zo hoog was bij de opslagtransacties ten opzichte van de ophaaltransacties. Deze daling kan verklaard worden doordat opslagtransacties telkens starten aan het LU-punt. Omdat het LU-punt het rustpunt van de shuttles is, zijn er meestal ook shuttles beschikbaar vanaf dit punt, waardoor de wachttijd voor een beschikbare shuttle daalt, wat resulteert in een lage transactiecyclustijd. Voor opslagtransacties kan de cyclustijd percentueel tussen 2 en 16% dalen, terwijl dit voor ophaaltransacties ligt tussen 1 en 8% (Roy et al., 2015).

In een onderzoek omtrent planningsbeslissingen worden vier verschillende planningsbeslissingen onder de loep genomen en wordt geanalyseerd welke combinatie de beste prestatie neerzet op vlak van cyclustijd per transactie en de bezettingsgraad per shuttle en lift. De eerste operationele planningsbeslissing die onderzocht wordt, is het rustpuntbeleid van de shuttle. Hierbij worden enkel POSC en POLL als opties meegenomen in het onderzoek. Het LU-punt, dat door Roy et al. (2015) bewezen werd optimaal te zijn, werd hier dus niet mee in rekening genomen. Verder werd



ook de scheduling regel, oftewel de planningsregel van transacties, onderzocht, waarbij het FCFS-principe en het SDT-principe als keuzemogelijkheden geanalyseerd werden. Daarnaast werd de opportunistische interleaving regel vergeleken ten opzichte van geen regel. Tenslotte werd ook de strategische beslissing, locatie van het LU-punt mee gemodelleerd. Om de gemiddelde cyclustijd per transactie en de gemiddelde bezetting per shuttle en lift zo laag mogelijk te houden, dan wordt de volgende combinatie als optimaal bevonden: 1) POLL als rustpunt, 2) SDT als dienstregel voor de transacties, 3) Opportunistische interleaving rule en 4) LU-punt in het midden van de gang (Ekren et al., 2010).

Verder bestaat er een relatie tussen het optimaal aantal verticale zones die best geïmplementeerd worden en het aantal niveaus (Kumar et al., 2013). Zoals uitgelegd in Sectie 3.2.3 is in het algemeen de verticale zone-indeling (1, T-1) een efficiënte ontwerpkeuze voor een T-niveau systeem, waarbij T het aantal niveaus is, zowel in het geval van configuraties met vijf als met zeven niveaus. De eerste zone bestaat dan uit het eerste niveau waaraan shuttles toegewezen worden en een tweede zone bestaat uit alle andere niveaus waar de voordelen van shuttlepooling wel nog gelden. Een tweede relatie werd gevonden tussen het optimaal aantal verticale zones en het D/W-verhouding van de rekken. Een optimale verticale zone-indeling kan de transactiecyclustijd tot 12% reduceren in vergelijking met de gepoolde shuttleconfiguratie. Dit effect hangt wel samen met de D/W-verhouding van de rekken. Hoe hoger de D/W-verhouding, hoe groter het effect op de transactiecyclustijd. (Kumar et al., 2013).

Tenslotte komt een relatie tussen het verwerkingsbeleid van de transacties en het aantal niveaus en de rekhoogte en ganglengte aan het licht. Uit onderzoek blijkt dat het parallel verwerkingsbeleid in kleinschalige AVS/RS-systemen (als het aantal niveaus kleiner is dan 10) beter presteert dan het sequentiële verwerkingsbeleid. In een dergelijk systeem is de gemiddelde verbetering van de reactietijd van het systeem minstens 5,51%. Het voordeel van het parallel verwerkingsbeleid neemt af naarmate de rekhoogte en de ganglengte toenemen. In grote systemen, dat wil zeggen waar het aantal niveaus groter is dan 10 en de verhouding tussen de ganglengte en de rekhoogte groter is dan 7, wordt een kritisch punt in de aankomstsnelheid van de ophaaltransactie gevonden. Wanneer de aankomstsnelheid van de ophaaltransactie minder is dan dit kritische niveau, moet het tier-captive AVS/RS-systeem het parallel verwerkingsbeleid volgen, in het andere geval moet het het sequentiële verwerkingsbeleid volgen (Zou et al., 2016).

Bovenstaande relaties worden schematisch voorgesteld in Tabel 6. Verder wordt in Appendix B van deze masterproef een tabel met de wetenschappelijke literatuur die gebruikt werd voor het onderzoeken van alle planningsbeslissingen en hun relaties opgenomen.

Tabel 6: Onderzochte relaties tussen planningsbeslissingen

	RS	ST	Z	PT	VT	OB	CC	BB	TB & SB
RS				1			1		2
ST									1
Z									2
PT							1		1
VT									1
OB									1
CC									1
BB									2
TB & SB									



## 4 Conclusie

Dit onderzoek stelt vast dat er heel wat planningsbeslissingen genomen moeten worden in een gerobotiseerd magazijn dat gebruik maakt van een RMFS-systeem of AVS/RS-systeem. Deze masterproef verdiept zich vooral op de complexiteit van de operationele planningsbeslissingen. Het blijkt dat tussen de twee systemen heel wat planningsbeslissingen overeenkomen. Zo moeten in beide systemen opslag- en ophaaltransacties op een bepaalde manier toegewezen worden aan de shuttles/robots. Maar aan bepaalde aspecten zoals padplanning of batterijmanagement die reeds onderzocht werden bij RMFS-systemen, wordt geen aandacht besteed in de wetenschappelijke literatuur van AVS/RS-systemen. Beide systemen maken gebruik van parts-to-picker systemen om de goederen naar de werkstations te transporteren. Deze gelijkenis zorgt ervoor dat een groot deel van de operationele beslissingen elkaar overlappen. Een correcte toewijzing van de robots of shuttles zal cruciaal zijn voor een optimalisatie van de paden die de robots of shuttles afleggen.

Binnen het AVS/RS-systeem is de keuze van de rustplaats van de shuttles een belangrijke operationele planningsbeslissing omdat deze invloed heeft op de reistijd van de volgende transactie. Deze beslissing wordt dan ook uitgebreid toegelicht en er wordt onderzocht welke plaats, POSC, LU-punt of POLL het meest optimaal is. Bij het RMFS-systeem rusten de inactieve robots onder de beweegbare rekken (pods) die niet nodig zijn voor een opslag- of ophaaltransactie. Zo is de rustpunt binnen het RMFS-systeem geen beslissing die nog moet genomen worden, maar meer een gegeven. Dit gegeven komt er doordat robots die rusten binnen het raster van nodes andere robots kunnen blokkeren op hun pad. Het is dus veruit efficiënter om deze te stockeren onder pods binnen het magazijn. Binnen het RMFS-systeem is de opslaglocatie van de pods doorslaggevend omdat de pods de SKU's bezitten.

Een andere cruciale dagdagelijkse planningsbeslissing is het opslagbeleid, zowel voor het RMFS-systeem, waar de goederen op de beweegbare rekken geplaatst worden, als voor het AVS/RS-systeem, waarbij de goederen toegewezen worden aan opslaglocaties binnen de rekstructuur. Binnen het AVS/RS-systeem kan dit willekeurig, specifiek of klasse-gebaseerd gebeuren. Het RMFS-systeem splitst dit opslagbeleid op in twee verschillende planningsbeslissingen, enerzijds welke goederen op welke pods gestockeerd zullen worden (RPS) en anderzijds welke plaats deze pods in het magazijn toegewezen krijgen (PSA). In het RMFS-systeem worden de goederen op de pods geplaatst met een zo groot mogelijke spreiding. Dit om te garanderen dat er meerdere pods aan een bepaalde order kunnen voldoen. Voor de pods die veel gevraagd worden, wordt een beleid gehanteerd waarbij pods met de meest gevraagde SKU's ook preferentiële locaties in het magazijn zullen krijgen. Deze beslissing overlapt het willekeurig toewijzen van de SKU's aan de opslaglocaties binnen de rekstructuur van een AVS/RS-systeem. Toch toont het ook gelijkenissen met het klasse-gebaseerd opslagbeleid van het AVS/RS-systeem, waarbij de klassen gedefinieerd worden op basis van de omzetkarakteristieken. De meest gevraagde SKU's bevinden zich hier op het laagste niveau, zodat hiervoor geen liftbewegingen, die doorgaans wachttijden met zich meebrengen, nodig zijn.

Zowel in het RMFS-systeem als in het AVS/RS-systeem kunnen de robots/shuttles elkaar blokkeren. De manier waarop met blokkeringen wordt omgegaan is een operationele beslissing.

In beide systemen werden hiervoor blokkeringsprotocollen opgesteld om vertragingen ten gevolge van blokkeringen tot een minimum te beperken. Binnen het RMFS-systeem zijn vier mogelijke oplossingen om om te gaan met het stilvallen van het systeem. In het AVS/RS-systeem wordt vastgesteld dat blokkeringen op 3 plaatsen binnen het magazijn kunnen voorkomen: in de dwarsgang, in een gangpad en op het kruispunt van een gangpad en de dwarsgang. Hiervoor worden blokkeringsprotocollen voorgeschreven om deze blokkeringen te vermijden. Ook is binnen het RMFS-systeem de planning van de paden (PP) van essentieel belang om blokkades te vermijden. De nodes worden toegewezen aan een robot binnen een bepaald tijdvenster. Vertragingen binnen het systeem of het stilvallen van het systeem zorgen voor blokkades.

Padplanning en laadstrategieën van robots worden uitgebreid onderzocht binnen het RMFS-systeem, maar worden niet aangehaald in de literatuur van het AVS/RS-systeem. Het verwerkingsbeleid van AVS/RS-systemen beschrijft wel hoe de liften en shuttles geclaimd kunnen worden door een transactie, maar padplanning is in horizontale AVS/RS-systemen bijvoorbeeld niet nodig omdat shuttles het order horizontaal picken en verder vervoeren naar de lift voor verticaal transport.

Zowel voor het RMFS-systeem als voor het AVS/RS-systeem zijn over het algemeen weinig relaties tussen de verschillende operationele planningsbeslissingen onderzocht. De meeste operationele beslissingen van een AVS/RS-systeem werden in de literatuur geanalyseerd en gecombineerd met tactische of strategische beslissingen, zoals de D/W-verhouding van de rekken. Waar het aantal SKU's die opgeslagen kunnen worden in een RMFS-systeem bepaald wordt door de beschikbare oppervlakte, heeft een AVS/RS-systeem dat niet. Het AVS/RS-systeem wordt in de hoogte gebouwd en heeft daarom minder oppervlakte nodig om hetzelfde aantal SKU's te stockeren. Maar het magazijn met een AVS/RS-systeem is dan wel weer gevoeliger qua lay-out dan een RMFS-systeem. De strategische en tactische beslissingen zijn van groot belang en hebben een grote invloed op de performantie van het magazijn. Vandaar dat operationele beslissingen vaak gecombineerd worden met hun strategische en tactische varianten. Dit is niet zo voor de onderzochte operationele planningsbeslissingen in een RMFS-systeem. Deze werden vooral als individuele beslissingen bekeken, zonder enige andere beslissing hiermee te combineren. De strategische beslissingen bepalen waar de werkstations zich zullen bevinden. Die plaats heeft rechtsreeks invloed op de werking van het RMFS-systeem. Door het doordacht alloceren van deze werkstations in het magazijn kan met de paden te verkorten de doorstroom verhoogd worden. Dit is slechts een voorbeeld van de samenhang tussen zowel strategisch, tactisch als operationeel niveau.

## **5 Aanbevelingen**

Zoals reeds besproken in de conclusie, kan er in het algemeen geconcludeerd worden dat er nog te weinig onderzoek gedaan werd naar de relaties tussen verschillende planningsbeslissingen. Hieronder volgt per robotsysteem een opsomming van relaties tussen planningsbeslissingen die nuttig lijken om in de toekomst te onderzoeken.

### **5.1 Aanbevelingen voor toekomstig onderzoek naar het RMFS-systeem**

Binnen het RMFS-systeem is er reeds veel onderzoek gedaan naar de meeste operationele planningsbeslissingen. Er is een duidelijk beeld over de nodige beslissingen en wat deze inhouden. Op het vlak van de relaties tussen de verschillende beslissingen is er zeker nog meer onderzoek vereist (Wurman et al., 2008). In de literatuur wordt weinig aandacht besteed aan de rustplaats van de robots wanneer ze niet actief bezig zijn met het vervullen van taken. De robots hebben de mogelijkheid onder de gestationeerde pods te schuiven om zo andere robots die actief bezig zijn met het vervullen van een order niet te blokkeren (Merschformann, 2017).

De verschillende soorten laadstrategieën worden besproken in Sectie 2.1.2. Verder onderzoek naar een mogelijke snellader ('super charger') zou in de toekomst nuttig zijn. Ook een uitbreiding van de capaciteit van de batterijen dient te worden bestudeerd. Er is een potentiële relatie tussen de toewijzing van orders aan de robots en de manier van opladen. Wanneer de robot inductief kan laden aan het werkstation zal deze relatie niet veel invloed hebben. Wanneer de robots echter moeten laden in het laadstation zal deze relatie wel invloed hebben op de toewijzing van de orders. Er zal continu aandacht besteed moeten worden aan de beschikbare batterijcapaciteit van de robots op het moment dat ze toegewezen worden aan een order. Dit om te verzekeren dat de robot de order zal kunnen voldoen met de beschikbare batterijcapaciteit. Deze relatie dient nog verder onderzocht te worden. Door het goed managen van de toewijzing van orders in combinatie met het laden kan het algemeen energieverbruik dalen (Zou et al., 2018).

Naast het batterijverbruik en de rustplaats van de robots is het algemeen kader van het RMFS-systeem nog voor verder onderzoek vatbaar. Het merendeel van de literatuur focust zich op de magazijnen die B2C orders vervullen waarbij het eindproduct dus rechtsreeks naar de consument gaat. Het kan nuttig zijn om in verder onderzoek de focus te verleggen naar de B2B situatie om na te gaan of hier de voordelen van het RMFS-systeem ook van toepassing zijn.

### **5.2 Aanbevelingen voor toekomstig onderzoek naar het AVS/RS-systeem**

Uit onderzoek bleek dat het LU-punt een optimaal rustpunt om transactiecyclustijden te verminderen. Hierbij werden verschillende assumpties gemaakt zowel op vlak van strategische, tactische als operationele beslissingen. Toekomstig onderzoek kan nagaan of er een relatie is tussen de keuze van de rustplaats van de shuttle en bijvoorbeeld het voeren van een SC of DC-cycli. Zowel de keuze van het rustpunt van de shuttle als het type commando-cyli hebben een invloed op de transactiecyclustijden. Ook werd het LU-punt als optimaal rustpunt bevonden in de veronderstelling dat elke beschikbare shuttle toegewezen kan worden aan de volgende transactie (willekeurige shuttletoewijzingsbeleid) en dat ladingen uniform toegewezen worden aan hun opslaglocaties (specifieke opslagbeleid). Ook hier kan toekomstig onderzoek uitwijzen of deze

planningsbeslissingen onder andere omstandigheden ook optimaal presteren en dus een relatie vormen (Roy et al., 2015).

Er is een mogelijke relatie tussen het gekozen rustpuntbeleid en de shuttletoewijzing. Zoals besproken in Sectie 3.2.1 kan een pallet bij aankomst in het magazijn ofwel een stilstaande shuttle vinden, ofwel geen stilstaande shuttle. Als er een beschikbare shuttle is, moet deze toegewezen worden aan de opslagtransactie. De manier waarop shuttles toegewezen worden aan transacties, bijvoorbeeld preferentieel, waarbij een bepaalde klasse van shuttles de voorkeur krijgt om opslagtransacties door te voeren en een andere klasse de voorkeur krijgt om ophaaltransacties door te voeren, kan voordelig zijn bij het volgen van een POSC-rustpuntbeleid. Hierbij bevinden shuttles zich na het voltooien van de transacties ofwel op het LU-punt (bij een ophaaltransactie) ofwel op een punt binnen de stellingstructuur (bij een opslagtransactie). Zo lijkt het voordelig om het POSC-rustpuntbeleid in combinatie met een preferentieel shuttletoewijzingsbeleid te gebruiken. Dit is echter niet aangetoond, maar kan voor toekomstig onderzoek interessant zijn.

Verder kan er een potentiële relatie zijn tussen het vormen van zones waaraan shuttles worden toegewezen en het shuttletoewijzingsbeleid binnen een AVS/RS-magazijn. Het toewijzen van shuttles aan zones wil zeggen dat deze shuttles enkel transacties kunnen verwerken binnen deze zone. Dit vermindert het voordeel van voertuigpoolingeffecten, waar elke shuttle elke opslaglocatie kon bereiken (Roy et al., 2012).

In Sectie 3.3 werd het onderzoek van Ekren et al. (2010) reeds aangehaald, waarbij vier verschillende planningsbeslissingen onderzocht worden. Hierbij wordt de gemiddelde cyclustijd per transactie en de gemiddelde bezetting per shuttle en lift zo laag mogelijk gehouden en wordt de volgende combinatie als optimaal bevonden: 1) POLL als rustpunt, 2) SDT als dienstregel voor de transacties, 3) Opportunistische interleaving rule en 4) LU-punt in het midden van de gang. Waarom deze combinatie zo optimaal is, werd niet meegedeeld, noch onderzocht. Daarom kan in verder onderzoek zeker aanbevolen worden om deze relaties te onderzoeken (Ekren et al., 2010).

Tenslotte wordt ook sterk aangeraden om verder onderzoek te verrichten naar het verticaal AVS/RS-systeem omdat het op verschillende manieren de performantie van het horizontaal AVS/RS-systeem lijkt te overtreffen. Dus is verder onderzoek zeker wenselijk.

## 6 Referenties

Azadeh, K, de Koster, M.B.M, & Roy, D. (2017). *Robotized Warehouse Systems: Developments and Research Opportunities* (No. ERS-2017-009-LIS). *ERIM report series research in management Erasmus Research Institute of Management*.

Azadeh, K, Roy, D, & de Koster, M.B.M. (2016). *Vertical or Horizontal Transport? - Comparison of robotic storage and retrieval systems*. *ERIM report series research in management Erasmus Research Institute of Management*.

Bogue, R. (2016). Growth in e-commerce boosts innovation in the warehouse robot market. *Industrial Robot: An International Journal*, 43(6), 583–587.

Boysen, N., Briskorn, D., & Emde, S. (2017). Parts-to-picker based order processing in a rack-moving mobile robots environment. *European Journal of Operational Research*, 262(2), 550–562.

D'Andrea, R. (2012). Guest Editorial: A Revolution in the Warehouse: A Retrospective on Kiva Systems and the Grand Challenges Ahead. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 9(4), 638–639.

Dhiraj, J., & Sharma, Y. (2017). Adoption of next generation robotics: A case study on Amazon. *perspectiva*, 3, 2394–9961.

Ekren, B. Y., & Heragu, S. S. (2011). Simulation based performance analysis of an autonomous vehicle storage and retrieval system. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19(7), 1640–1650.

Ekren, B. Y., Heragu, S. S., Krishnamurthy, A., & Malmborg, C. J. (2010). Simulation based experimental design to identify factors affecting performance of AVS/RS. *Computers & Industrial Engineering*, 58(1), 175–185.

Ekren, Banu Yetkin, & Heragu, S. S. (2009). Simulation-based regression analysis for the rack configuration of an autonomous vehicle storage and retrieval system. *International Journal of Production Research*, 48(21), 6257–6274.

Ekren, Banu Yetkin. (2011). Performance evaluation of AVS/RS under various design scenarios: a case study. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 55(9–12), 1253–1261.

Epp, M., Wiedemann, S., & Furmans, K. (2016). A discrete-time queueing network approach to performance evaluation of autonomous vehicle storage and retrieval systems. *International Journal of Production Research*, 55(4), 960–978.

Gu, J., Goetschalckx, M., & McGinnis, L. F. (2007). Research on warehouse operation: A comprehensive review. *European Journal of Operational Research*, 177(1), 1–21.



- Ham, A. (2020). Drone-Based Material Transfer System in a Robotic Mobile Fulfillment Center. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 17(2), 957–965.
- Hanson, R., Medbo, L., & Johansson, M. (2018). Performance Characteristics of Robotic Mobile Fulfillment Systems in Orderpicking Applications. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1493–1498.
- Hart, P.E., Nilsson, N.J, Raphael, B. (1968). A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths, *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics* SSC4 (2), 100-107.
- Heragu, S. S., Cai, X., Krishnamurthy, A., & Malmborg, C. J. (2011). Analytical models for analysis of automated warehouse material handling systems. *International Journal of Production Research*, 49(22), 6833–6861.
- Kim, H.-J., Pais, C., & Shen, Z.-J. M. (2020). Item Assignment Problem in a Robotic Mobile Fulfillment System. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 1–14.
- Krenzler, R., Xie, L., & Li, H. (2018). Deterministic Pod Repositioning Problem in Robotic Mobile Fulfillment Systems.
- Kumar, A., Roy, D., & Tiwari, M. K. (2013). Optimal partitioning of vertical zones in vehicle-based warehouse systems. *International Journal of Production Research*, 52(5), 1285–1305.
- Kuo, P-H., Krishnamurthy, A. and Malmborg, C.J. (2008) 'Performance modelling of autonomous vehicle storage and retrieval systems using class-based storage policies', *Int. J. Computer Applications in Technology*, 31, 238–248.
- Lienert, T., Stigler, L., & Fottner, J. (2019). Failure-Handling Strategies For Mobile Robots In Automated Warehouses. *ECMS 2019 Proceedings* edited by Mauro Iacono, Francesco Palmieri, Marco Gribaudo, Massimo Ficco.
- Malmborg, C. J. (2003). Interleaving dynamics in autonomous vehicle storage and retrieval systems. *International Journal of Production Research*, 41(5), 1057–1069.
- Marchet, G., Melacini, M., Perotti, S., & Tappia, E. (2012). Analytical model to estimate performances of autonomous vehicle storage and retrieval systems for product totes. *International Journal of Production Research*, 50(24), 7134–7148.
- Marchet, G., Melacini, M., Perotti, S., & Tappia, E. (2013). Development of a framework for the design of autonomous vehicle storage and retrieval systems. *International Journal of Production Research*, 51(14), 4365–4387.
- Matthews, K. (2019). How warehouse robotics reduce worker injuries. *EHS Today*.
- Merschformann, M. (2018). Active repositioning of storage units in Robotic Mobile Fulfillment Systems. Springer International Publishing.

- Merschformann, M., Xie, L., & Li, H. (2017). *RAWSim-O: A Simulation Framework for Robotic Mobile Fulfillment Systems*. *Logistics Research*.
- Merschformann, M., Lamballais, T., de Koster, M. B. M., & Suhl, L. (2018). Decision Rules for Robotic Mobile Fulfillment Systems. *Operations Research Perspective*, 6.
- Pieri, A. S. (2016). Robotics to impact business productivity and workplace safety by 2020.
- Poudel, B. (2013). Coordinating Hundreds of Cooperative, Autonomous Robots in a Warehouse.
- Roodbergen, K. J., & Vis, I. F. A. (2009). A survey of literature on automated storage and retrieval systems. *European Journal of Operational Research*, 194(2), 343–362.
- Roy, D., Krishnamurthy, A., Heragu, S. S., & Malmberg, C. J. (2012). Performance analysis and design trade-offs in warehouses with autonomous vehicle technology. *IIE Transactions*, 44(12), 1045–1060.
- Roy, D., Krishnamurthy, A., Heragu, S. S., & Malmberg, C. J. (2014). Blocking Effects in Warehouse Systems With Autonomous Vehicles. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 11(2), 439–451.
- Roy, D., Krishnamurthy, A., Heragu, S., & Malmberg, C. (2015). Queuing models to analyze dwell-point and cross-aisle location in autonomous vehicle-based warehouse systems. *European Journal of Operational Research*, 242(1), 72–87.
- Roy, D., Krishnamurthy, A., Heragu, S.S. and Malmberg, C.J. (2016). A simulation framework for studying blocking effects in warehouse systems with autonomous vehicles. *European J. Industrial Engineering*, 10(1), 51–80.
- Van Gils, T., Ramaekers, K., Caris, A., & De Koster, R. B. M. (2018). Designing Efficient Orderpicking Systems by Combining Planning Problems: State-of-the-art Classification and Review, 267(1), 1–15.
- Wulfraat, M., (2012). Is kiva systems a good fit for your distribution center? an unbiased distribution consultant evaluation.
- Wurman, P. R., R. D’Andrea, and M. Mountz (2008). Coordinating hundreds of cooperative, autonomous vehicles in warehouses. *AI Magazine*, 29(1), 9.
- Xie, L., Thieme, N., Krenzler, R., & Li, H. (2019). Efficient order picking methods in robotic mobile fulfillment systems.
- Yin, Y.-L., & Rau, H. (2005). Dynamic selection of sequencing rules for a class-based unit-load automated storage and retrieval system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 29(11–12), 1259–1266.

Zou, B., Xu, X., (Yale) Gong, Y., & De Koster, R. (2016). Modeling parallel movement of lifts and vehicles in tier-captive vehicle-based warehousing systems. *European Journal of Operational Research*, 254(1), 51–67.

Zou, B., XU, X., Gong, Y., & de Koster, R. (2018). Evaluating battery charging and swapping strategies in a robotic mobile fulfillment system. *European Journal of Operational Research*, 267(2).

## 7 Appendix

### 7.1 Appendix A: classificatietabel van de gehanteerde literatuur (RMFS-systeem)

	<i>Boysen et al., 2017</i>	<i>Merschformann et al., 2018</i>	<i>Wurman et al., 2008</i>	<i>Poudel et al., 2013</i>	<i>Enright et al., 2011</i>	<i>Krenzler et al., 2018</i>	<i>Merschformann, 2017</i>	<i>Merschformann, 2018</i>
<i>POA</i>		x						
<i>ROA</i>	x	x						
<i>PPS</i>		x		x	x			
<i>RPS</i>	x	x						
<i>PSA</i>	x	x				x		x
<i>TA</i>		x			x			
<i>PP</i>		x		x				

## 7.2 Appendix B: classificatietabel van de gehanteerde literatuur (AVS/RS-systeem)

		Kuo et al., 2008	Ekren et al., 2010	Roy et al., 2012	Kumar et al., 2013	Roy et al., 2014	Roy et al., 2015	Roy et al., 2016	Zou et al., 2016
<b>Operationele beslissingen</b>	<i>Rustplaats shuttle (RS)</i>		x				x		
	<i>Regels voor shuttletoewijzing (ST)</i>			x					
	<i>Shuttles toewijzen aan zones (Z)</i>			x	x				
	<i>Planningsregel van de transacties (PT)</i>		x						
	<i>Verwerking van de transacties (VT)</i>								x
	<i>Opslagbeleid (OB)</i>	x							
	Type commando-cycli (CC)		x						
	Blokkeringsbeleid (BB)						x		x
<b>Tactische en strategische beslissingen</b>		x	x	x	x	x	x	x	x