



UHASSELT

KNOWLEDGE IN ACTION

Faculteit Bedrijfseconomische Wetenschappen

master in de handelswetenschappen

Masterthesis

Automatisering binnen magazijnen

Ward Scheymans

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

PROMOTOR :

dr. Ruben D'HAEN



UHASSELT

KNOWLEDGE IN ACTION

www.uhasselt.be

Universiteit Hasselt

Campus Hasselt:

Martelarenlaan 42 | 3500 Hasselt

Campus Diepenbeek:

Agoralaan Gebouw D | 3590 Diepenbeek

2024
2025



Faculteit Bedrijfseconomische Wetenschappen

master in de handelswetenschappen

Masterthesis

Automatisering binnen magazijnen

Ward Scheymans

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

PROMOTOR :

dr. Ruben D'HAEN

Woord vooraf

Deze masterproef vormt het sluitstuk van mijn opleiding Handelswetenschappen met afstudeerrichting Supply Chain Management aan de Universiteit Hasselt. In deze masterproef wordt onderzocht welke factoren een rol spelen bij de implementatie van automatisering binnen magazijnen, met een specifieke focus op de automatisering van order picking. Na overleg met mijn promotor werd besloten om de nadruk te leggen op de besluitvorming over automatisering en de bijhorende voordelen, uitdagingen en trends.

Mijn interesse in dit onderwerp werd gewekt door de steeds toenemende digitalisering binnen de logistieke sector en de impact die automatisering kan hebben op efficiëntie en operationele processen. Het was bijzonder boeiend om te analyseren hoe bedrijven omgaan met deze technologische ontwikkelingen en welke strategische keuzes zij maken in dit kader. Dit onderzoek heeft mijn inzicht in magazijnbeheer en de rol van technologie binnen supply chain management aanzienlijk verrijkt.

Hoewel het schrijven van deze masterproef grotendeels een zelfstandig proces was, had ik dit niet kunnen realiseren zonder de steun en de begeleiding van enkele belangrijke personen. Daarom wil ik mijn oprechte dank betuigen aan mijn promotor dr. Ruben D'Haen, voor zijn waardevolle feedback en adviezen gedurende het onderzoek. Zijn inzichten hebben een essentiële bijdrage geleverd aan het academische niveau en de structuur van deze thesis. Daarnaast wil ik mijn dankbaarheid uitspreken aan de respondenten en experts die hun tijd en kennis hebben gedeeld. Hun praktijkervaringen en inzichten waren van onschatbare waarde voor de totstandkoming van deze studie.

Tot slot wil ik mijn familie en vrienden bedanken voor hun voortdurende steun en motivatie gedurende dit project. Hun aanmoedigingen hebben mij geholpen om dit onderzoek met vastberadenheid en enthousiasme af te ronden.

Ik hoop dat deze masterproef bijdraagt aan een beter begrip van de rol van automatisering binnen magazijnen en inspiratie biedt voor verdere academische en praktijkgerichte studies in dit domein.

Samenvatting

In een snel evoluerend logistiek landschap vormt magazijnautomatisering een strategisch speerpunt voor bedrijven die streven naar meer efficiëntie, snelheid en foutreductie binnen hun supply chain. Deze masterproef onderzoekt hoe automatisering binnen magazijnen, en meer specifiek binnen het order pickingproces, vorm krijgt in de praktijk. Deze masterproef onderzoekt de implementatie van automatisering binnen magazijnen met specifieke aandacht voor het order pickingproces. Het doel van het onderzoek is om inzicht te verwerven in de verschillende types automatiseringstechnologieën die vandaag beschikbaar zijn, hun invloed op magazijnprestaties en de factoren die de keuze voor een bepaald type automatisering bepalen. Deze studie bestaat uit een uitgebreid literatuuronderzoek aangevuld met vier diepte-interviews bij bedrijven in diverse sectoren (automotive, retail, productie en logistiek). De literatuurstudie bespreekt de functionele rollen van magazijnen, de evolutie van order pickingtechnologieën en de strategische overwegingen bij automatiseringsbeslissingen. De studie behandelt onder meer de functies van magazijnen, order pickingstrategieën, ontwerpprincipes van order pickingsystemen (OPS), en de rol van automatiseringstechnologieën zoals AS/RS-systemen, VLM's, AGV's en AMR's. Via een diepgaande literatuurstudie worden de theoretische kaders en systemen in kaart gebracht, waarna een empirisch luik bestaande uit vier diepte-interviews met bedrijven uit diverse sectoren een praktijkgerichte aanvulling vormt. Door theorie en praktijk met elkaar te confronteren, beoogt deze masterproef aanbevelingen te formuleren die relevant zijn voor bedrijven die overwegen om hun magazijnprocessen te automatiseren.

Resultaten van het onderzoek

De academische literatuur beschrijft automatisering in magazijnen als een strategisch middel om efficiëntie, foutreductie, snelheid en betrouwbaarheid te verhogen binnen het order pickingproces. Verschillende studies benadrukten dat automatiseringstechnologieën voornamelijk effectief zijn in sterk gestandaardiseerde omgevingen met hoge volumes en repetitieve processen. ROI-analyse, schaalbaarheid, flexibiliteit en producthomogeniteit worden hierbij als cruciale randvoorwaarden aangehaald. Daarnaast onderlijnen recente bijdragen het belang van een robuuste IT-infrastructuur, een doordacht change management en de interactie tussen mens en technologie. De toenemende aandacht voor ergonomie, werkorganisatie en acceptatie door personeel toont aan dat automatisering niet los kan worden gezien van organisatorische context en menselijke dynamiek. Wanneer deze theoretische inzichten worden getoetst aan de vier bedrijfsinterviews, blijkt dat veel deze concepten gelijkenissen vertonen in de praktijk maar dat de implementatie steeds vorm krijgt in functie van contextuele kenmerken. De keuze voor technologie wordt grotendeels bepaald door factoren zoals het SKU-profiel, het niveau van processtandaardisatie, het beschikbare investeringsbudget en de fysieke beperkingen van de magazijninfrastructuur.

De empirische analyse van vier bedrijfsinterviews bevestigt dat magazijnautomatisering geen universele aanpak kent, maar sterk afhangt van contextuele factoren zoals productassortiment, schaalgrootte, standaardisatiegraad en investeringscapaciteit. Elk bedrijf positioneert zich anders binnen het

automatiseringsspectrum, waarbij keuzes voor technologieën afgestemd zijn op operationele realiteit en strategische doelen. Zo hanteren Toyota en het kledingbedrijf, beide actief in sterk gestandaardiseerde omgevingen met hoge volumes, verregaande automatisering. Toyota maakt gebruik van geautomatiseerde hoogbouwmagazijnen, terwijl het kledingbedrijf een geavanceerd shuttlesysteem en parts-to-picker-oplossingen inzet. Deze systemen zijn geschikt voor repetitieve processen met uniforme producten en grote SKU-aantallen. In tegenstelling daarmee bevinden e-power en H.Essers zich in een eerder hybride fase. Beide combineren manuele arbeid met gedeeltelijke automatisering. H.Essers gebruikt VLM-systemen en scanningtechnologie in een context met ADR-goederen en onregelmatige volumes. E-power integreert ergonomische hulpmiddelen en scanningtools, maar blijft afhankelijk van handmatig order picken vanwege lage standaardisatie en variërende productafmetingen. De motieven voor automatisering vertonen gelijkenissen: kostenefficiëntie, foutreductie, ruimtegebruik en verwerkingssnelheid worden als belangrijkste drijfveren genoemd. Daarnaast spelen ook strategische motieven zoals ergonomie, arbeidsmarktkrapte en medewerkerstevredenheid een rol. Tegelijk geven alle bedrijven aan dat automatisering beperkingen kent. Specifieke taken, zoals het hanteren van delicate of onregelmatige goederen, blijven moeilijk te automatiseren door de nood aan menselijke flexibiliteit. Daarom kiezen bedrijven vaak voor hybride systemen die mens en technologie combineren.

De impact op personeel blijkt genuanceerd. Automatisering leidt niet noodzakelijk tot jobverlies, maar tot functieverandering: fysieke taken worden vervangen door toezicht- of coördinatiefuncties. Opleiding, betrokkenheid en communicatie blijken essentieel voor succesvolle transitie. Alle respondenten benadrukken het belang van interne acceptatie om weerstand te minimaliseren en adoptie te bevorderen. Schaalbaarheid en standaardisatie komen naar voren als belangrijke voorwaarden voor verdere automatisering. Bedrijven met een gestroomlijnd productassortiment en hoge volumes halen sneller voordeel uit volledige automatisering dan organisaties met hoge SKU-variatie of onvoorspelbare vraag. Technologische oplossingen moeten dus steeds in lijn liggen met de operationele en strategische kenmerken van de onderneming. De bevindingen bevestigen dat automatisering contextafhankelijk is, en niet via een uniforme manier kan worden uitgerold. In tegenstelling tot de literatuur, die automatisering vaak presenteert als doelgerichte strategie gericht op efficiëntie, blijkt uit de praktijk dat ook mensgerichte en organisatorische factoren essentieel zijn. De realiteit toont een complex samenspel tussen technologie, mens en proces. Een eerste belangrijk inzicht is het spanningsveld tussen standaardisatie en flexibiliteit. Waar de literatuur standaardisatie beschouwt als noodzakelijke voorwaarde voor automatisering, blijkt uit de praktijk dat flexibiliteit onmisbaar blijft in sectoren met wisselende productmix of klant specifieke eisen. In zulke contexten, zoals bij e-power en H.Essers, wordt automatisering beperkt tot repetitieve processen terwijl manuele arbeid behouden blijft voor variabele taken. Dit onderstreept het belang van hybride systemen waarin mens en technologie elkaar aanvullen.

Een tweede bevinding betreft infrastructuur en investeringsvermogen als bepalende factoren voor automatiseringsgraad. Bedrijven erkennen de voordelen van automatisering, maar ondervinden beperkingen door bestaande magazijnconfiguraties, ruimtegebrek of hoge investeringskosten. Beslissingen worden daarom niet louter strategisch genomen, maar ook ingegeven door praktische en

financiële randvoorwaarden. Dit sluit aan bij literatuur die pleit voor een geïntegreerde kosten-batenanalyse waarbij ROI in functie staat van het volledige systeemecosysteem. Een derde inzicht betreft de rol van IT-ondersteuning. Hoewel academische aandacht vaak uitgaat naar fysieke technologieën zoals robots en conveyors, blijkt een performant WMS en goede data-integratie cruciaal. Zonder robuuste IT-infrastructuur kunnen geavanceerde systemen hun potentieel niet benutten. Automatisering is dus slechts zo sterk als de digitale ondersteuning die haar aanstuurt. Ook op organisatorisch vlak is automatisering geen neutrale ingreep. Zowel literatuur als praktijk tonen aan dat automatisering steeds meer als een strategische keuze wordt gezien. In tegenstelling tot het klassieke beeld van automatisering om kosten te verminderen instrument, blijkt uit de interviews dat bedrijven automatisering inzetten om klanttevredenheid, leverbetrouwbaarheid, snelheid en schaalbaarheid te verbeteren.

Deze masterproef draagt bij aan het academische inzichten door praktijkervaringen te confronteren met bestaande theorie. De literatuur wordt grotendeels bevestigd inzake het belang van standaardisatie en ROI, maar de praktijk toont aan dat bijkomende factoren zoals infrastructuur, personeelsdynamiek en IT-capaciteit vaak doorslaggevend zijn. Dit benadrukt de nood aan een geïntegreerde benadering van automatiseringsvraagstukken, waarin technische, economische, organisatorische en menselijke componenten in samenhang worden beschouwd.

Kritische beschouwing

Deze masterproef levert waardevolle inzichten op in de praktijk van magazijnautomatisering maar kent ook enkele beperkingen. Door de kleinschalige opzet en de focus op vier Belgische bedrijven is de externe validiteit beperkt. De context specifieke aard van de casestudies bemoeilijkt de generaliseerbaarheid van de bevindingen naar andere sectoren of internationale omgevingen. Daarnaast ligt de nadruk op het functionele luik van automatisering met specifieke aandacht voor order picking, intern transport en ergonomie. Belangrijke thema's zoals IT-integratie, data-analyse en juridische of ethische aspecten kwamen minder aan bod, hoewel ze in de literatuur als strategisch relevant worden beschouwd. Tot slot blijkt ook de bestaande literatuur nog blinde vlekken te bevatten met relatief weinig aandacht voor organisatorische en culturele factoren die de implementatie van automatisering mee bepalen. Vervolgonderzoek kan zich daarom richten op grootschalige kwantitatieve analyses, IT-integratievraagstukken en de rol van AI en veranderingsmanagement in toekomstige automatisering strategieën.

Inhoud

1	Onderzoeksplan	9
1.1	Probleemstelling	9
1.2	Onderzoeksvragen.....	12
1.2.1	Centrale onderzoeksvraag	12
1.2.2	Deelvragen	13
1.3	Methodologie	14
2	De literatuurstudie.....	16
2.1	Functies en belang van magazijnen en distributiecentra	16
2.2	Goederenontvangst tot verzending	17
2.3	Opslagstrategieën binnen magazijnen.....	19
2.3.1	Willekeurige opslag en specifieke opslag.....	19
2.3.2	Omloopsnelheid en klasse gebaseerde opslag	19
2.4	Innovaties in order picking technologieën	20
2.5	Analyse van de verschillende OPS	21
2.6	Structuur van het order pickingproces	24
2.6.1	Het belang van efficiënte order picking	25
2.7	Optimalisatie van reistijd binnen order picking	25
2.8	Ontwerp van order pickingsystemen.....	27
2.9	Definitie en toepassingen van magazijnautomatisering	28
2.10	Automatisering als strategische keuze	30
2.11	De verschillende types automatisering	33
2.11.1	AS/RS-systemen	33
2.11.2	Shuttle-AS/RS	34
2.11.3	Carrousel-gebaseerde AS/RS	35
2.11.4	Verticale liftmodules (VLM).....	36
2.11.5	AGV's en AMR's	37
2.11.6	Cube storage	40
2.12	Mens-robot samenwerking binnen order picking systemen.....	40
3	Empirisch onderzoek	43
3.1	Voorstelling respondenten.....	43
3.2	Bespreking diepte-interviews.....	51
3.3	Reflectie op de literatuur	51
3.3.1	Type automatisering en gebruikt OPS-systemen	51
3.3.2	Motivaties voor automatisering	53
3.3.3	Beperkingen en grenzen van automatisering	54

3.3.4	Systeemgrenzen en foutgevoeligheid.....	54
3.3.5	Impact op personeel en werkorganisatie	55
3.3.6	Voorwaarden voor toekomstige automatisering	56
3.3.7	Standaardisatie als voorwaarde voor automatisering.....	57
4	Conclusie en verder onderzoek.....	61
4.1	Algemene conclusie	61
4.2	Beperkingen van het onderzoek	63
4.3	Suggesties voor verder onderzoek	63
5	Referentielijst.....	65

Afkortingenlijst

Afkorting	Definitie
IT	Information Technology
AI	Artificial intelligence
JIT	Just In Time
IoT	Internet of Things
WMS	Warehouse Management System
RFID	Radio Frequency IDentification
VAL	Value Added Logistics
VAS	Value Added Services
OPS	Order Picking System
RDT	Radio Data Terminal
AS/RS	Automated Storage and Retrieval Systems
AVS/RS	Autonomous Vehicle Storage and Retrieval System
AGV	Autonomous Guided Vehicle
VLM	Vertical Lift Module
AMR	Autonomous Mobile Robot
HOPS	Hybrid Order Picking System
LSP	Logistics Service Provider
ADR	L'Accord relatif au transport international de marchandises Dangereuses par Route
IATA	International Air Transport Association
PBM	Persoonlijke BeschermingsMaterialen
ESFR	Early Suppression Fast Response

Figuren- en tabellen lijst

Figuur 1 Typische warehouse functies en flows (De Koster et al., 2007).....	18
Figuur 2 Goederenflow in een geautomatiseerd magazijn (Azadeh et al., 2019).....	29
Figuur 3 Schets van een A-frame (Azadeh et al., 2019).....	30
Figuur 4 AS/RS systeem (Manzini et al., 2006).....	34
Figuur 5 AS/RS met kraan (Azadeh et al., 2019)	34
Figuur 6 Shuttle-AS/RS (Da Costa Barros & Nascimento, 2021).....	35
Figuur 7 Verticale carrousel (Pinto et al., 2023).....	36
Figuur 8 Horizontale carrousel (Azadeh et al., 2019).....	36
Figuur 9 Verticale lift module (Pinto et al., 2023).....	36
Figuur 10 AGV die goederen transporteert (Da Costa Barros & Nascimento, 2021)	38
Figuur 11 Verschillende soorten AGV's (AGV in uw magazijn SSI SCHÄFER, z.d.)	38
Figuur 12 Verschillende type AMR (Ames, 2021).....	39
Figuur 13 Cube storage (autostore) (W. Y. Ha, 2024)	40
Figuur 14 Cube storage (Azadeh et al., 2019)	40
Figuur 15 Pickingrobots (Zhang et al., 2023)	42
Tabel 1 Voor- en nadelen van picking systemen (Haase & Beimborn, 2017)	21
Tabel 2 Overzicht OPS-systemen	24

1 Onderzoeksplan

1.1 Probleemstelling

In de huidige verbonden wereldeconomie vormt logistiek de ruggengraat van handel. Logistiek wordt gedefinieerd als het proces van het plannen, implementeren en controleren van de efficiënte stroom en opslag van goederen, diensten en informatie van het punt van herkomst tot het punt van consumptie. Het belang ervan kan niet genoeg worden benadrukt, omdat effectief logistiek management een directe invloed heeft op klanttevredenheid, kostenefficiëntie en het concurrentievermogen van de organisatie (Kembro & Norrman, 2022). Magazijnen spelen een essentiële rol in het overbruggen van de kloof tussen productie en consumptie. Ze dienen als knooppunten waar goederen worden opgeslagen, gesorteerd en klaargemaakt voor verdere distributie zodat bedrijven effectief kunnen reageren op fluctuerende vraag- en aanbodpatronen.

Een magazijn is veel meer dan een opslagplaats, het is een dynamische omgeving waar voorraadbeheer, materiaalverwerking en orderverwerking samenkomen. Afhankelijk van het type magazijn, nl. van distributiecentra tot cross-docking faciliteiten, kunnen de operationele prioriteiten variëren maar het overkoepelende doel blijft hetzelfde: ervoor zorgen dat het klantorder op de juiste plaats wordt afgeleverd. Deze kritieke functie onderstreept het belang van het optimaliseren van magazijnoperaties om de algehele efficiëntie en betrouwbaarheid van toeleveringsketens te verbeteren (Winkelhaus et al., 2021). Magazijnen zijn cruciaal binnen vrijwel elke supply chain. Ze spelen een belangrijke rol in het ontvangen, opslaan, verzamelen en verzenden van goederen en vormen de schakel tussen productie en distributie. In een maatschappij waarin e-commerce blijft groeien wordt efficiënt magazijnbeheer steeds belangrijker. E-commercebedrijven staan bijvoorbeeld voor uitdagingen als kortere doorlooptijden, flexibele ordergroottes, een grote productvariatie en een onzekere vraag. De opkomst van geglobaliseerde supply chains heeft magazijnen en opslagruimtes veranderd tot meer geautomatiseerde en IT-gestuurde omgevingen (Kumar et al., 2021).

Tegelijkertijd heeft magazijnlogistiek ook een brede invloed op maatschappelijke en milieukwesties. Het energieverbruik van magazijnen dat vaak gekoppeld is aan verlichting, verwarming, koeling en geautomatiseerde systemen draagt bij aan de ecologische voetafdruk van logistieke operaties (Dadhich et al., 2015). Bovendien kunnen slechte arbeidsomstandigheden, zoals fysiek zware werkzaamheden, lange werktijden en een gebrek aan ergonomische voorzieningen, een negatieve impact hebben op het welzijn van werknemers (Grosse et al., 2017; Glock et al., 2019). Deze factoren maken duidelijk dat het optimaliseren van magazijnen verder gaat dan enkel operationele efficiëntie, er zijn ook bredere maatschappelijke en milieudoelen in het spel. De toenemende druk op magazijnen om zowel efficiënter als duurzamer te opereren maakt automatisering echter steeds relevanter. Veel bedrijven zien het als een strategisch beleidsdoel om niet alleen de operationele prestaties te verbeteren, maar ook bij te dragen aan bredere doelstellingen voor duurzame ontwikkeling. Geautomatiseerde systemen kunnen bijvoorbeeld helpen bij het verminderen van energieverbruik door processen te optimaliseren en slim

gebruik te maken van resources, terwijl ze tegelijkertijd fysieke arbeid verminderen wat kan leiden tot betere arbeidsomstandigheden (Zhen & Li, 2022).

De complexiteit van order picking in hedendaagse supply chains wordt versterkt door ontwikkelingen aan zowel de vraagzijde als de aanbodzijde van de supply chain. Aan de vraagzijde kunnen we zien dat door de opkomst van nieuwe verkoopkanalen zoals online winkelen, hogere eisen aan magazijnen worden gesteld. Klanten kunnen met een muisklik een bestelling plaatsen en verwachten een snelle, nauwkeurige en kostenefficiënte levering. Aan de aanbodzijde moeten bedrijven flexibeler en efficiënter opereren om aan deze klantverwachtingen te voldoen. Daarnaast kiezen veel logistieke bedrijven ervoor om kleinere magazijnen te consolideren in grotere distributiecentra om schaalvoordelen te realiseren. Hierdoor nemen de afstanden binnen een magazijn toe, terwijl de beschikbare tijd voor order picking afneemt (Lu et al., 2016).

De toenemende complexiteit van wereldwijde supply chains in combinatie met de toenemende vraag naar snelheid en nauwkeurigheid heeft een verschuiving in de richting van automatisering in magazijnen veroorzaakt. Hierdoor moeten bedrijven voortdurend streven naar meer efficiëntie en lagere operationele kosten (Custodio & Machado, 2020). Automatisering houdt in dat geavanceerde technologieën en systemen worden ingezet om taken uit te voeren die vroeger door mensen werden uitgevoerd. Door repetitieve en tijdrovende processen te automatiseren kunnen magazijnen efficiënter, nauwkeuriger en groter worden (Winkelhaus et al., 2021). Automatisatie binnen magazijnen beslaat verschillende functies en processen zoals goederenontvangst, opslag, order picking en verzending. Order picking processen vragen om aandacht, omdat deze processen arbeidsintensief kunnen zijn bij manuele systemen en kapitaalintensief bij geautomatiseerde systemen (Silva et al., 2020). Daarnaast streven bedrijven steeds meer naar kostenbesparing en productiviteitsverbetering binnen hun magazijnen en distributiecentra. Hierdoor krijgt order picking steeds meer aandacht als een cruciale factor in logistieke efficiëntie (De Koster et al., 2007). Order picking omvat het verzamelen van producten om aan de klantvraag te voldoen en wordt geschat op 55% van de totale magazijnkosten. Efficiëntie in deze processen is van essentieel belang voor de kostenstructuur en de algehele prestaties van een magazijn en daarmee de supply chain als geheel (Silva et al., 2020). Omdat order picking zo belangrijk is, kan het verstoringen in de toeleveringsketen veroorzaken en bij gevolg de algemene magazijnprestaties ondermijnen indien order picking inefficiënt of slecht beheerd wordt. Vanwege deze factoren wordt order picking door magazijnmanagers beschouwd als een prioritair aandachtsgebied voor productiviteitsverbeteringen (De Koster et al., 2007; Dallari et al., 2009; Chen et al., 2010).

Automatisatie speelt een cruciale rol in het verbeteren van de prestaties van magazijnen (Custodio & Machado, 2020). Traditionele methoden, die vaak afhankelijk zijn van handmatige arbeid zijn gevoelig voor inefficiëntie en fouten, vooral naarmate magazijnen groter en complexer worden. Veel bedrijven streven ernaar om hun magazijnen te moderniseren door het gebruik van verschillende automatiseringsoplossingen, zoals geautomatiseerde opslag- en ophaalsystemen, robots en AI-gestuurde optimalisatieprocessen (Casella et al., 2023). Deze systemen maken gebruik van sensoren, robotica en algoritmen voor machine learning om het order pickingproces te stroomlijnen en ervoor te

zorgen dat producten nauwkeurig en efficiënt worden opgehaald (Tang & Veelenturf, 2019). Het realiseren van een hoger automatiseringsniveau binnen magazijnen blijkt echter uitdagend en er zijn verschillende factoren die dit proces bemoeilijken (Gu et al., 2007). Een van de grootste obstakels is de hoge initiële investering die niet alleen bestaat uit de aanschaf van nieuwe technologieën, maar ook uit de kosten voor installatie, training van personeel en eventuele herstructurering van bestaande processen. Het implementeren van automatisering in magazijnen is een strategische stap die aanzienlijke investeringen vereist in zowel technologie als infrastructuur. Deze investeringen vormen de kern van moderne magazijnlogistiek en zijn van cruciaal belang voor het verbeteren van de efficiëntie, het minimaliseren van fouten en het vergroten van de concurrentiekracht binnen de supply chain. Het automatiseren van order picking verlaagt niet alleen de kosten maar verhoogt ook de nauwkeurigheid, verlaagt fouten en kan de veiligheid van de werknemers verbeteren (De Koster et al., 2007). Hoewel de voordelen van automatisering aanzienlijk zijn, is het belangrijk om de uitdagingen en beperking te erkennen die gepaard gaan met de implementatie ervan. De integratie van nieuwe technologieën in bestaande systemen kan complex zijn, vooral in magazijnen die werken met verouderde infrastructuur (Custodio & Machado, 2020). Daarnaast kunnen de complexe implementatie- en integratieprocessen bedrijven ontmoedigen, vooral wanneer er sprake is van een bestaande magazijninfrastructuur die niet eenvoudig aan nieuwe technologieën kan worden aangepast. Verder hebben bedrijven soms moeite om het verwachte serviceniveau te behalen bij de implementatie van automatiseringstechnologieën (Jenkins, 2024).

Hoewel automatisering repetitieve en arbeidsintensieve taken kan overnemen, kan het ook leiden tot zorgen onder werknemers over baan zekerheid. De behoefte aan geschoold personeel om geautomatiseerde systemen te beheren moeten zorgvuldig overwogen worden. Daarnaast moet automatisering dus ook rekening houden met het menselijke aspect een rol. (Davies et al., 2023). Bedrijven moeten daarom investeren in communicatie en training om een soepele overgang te waarborgen en het personeel voor te bereiden op samenwerking met geautomatiseerde systemen (Kelly, 2023). Bovendien is er bij bepaalde types van producten, vooral als het gaat om zeer wisselende of kwetsbare producten, nog steeds menselijke tussenkomst nodig. Daarom is een evenwichtige aanpak die de sterke punten van automatisering combineert met de flexibiliteit van de menselijke arbeid vaak de meest effectieve strategie (Dallari et al., 2009). Het gebruik van automatisering bij het order picking sluit ook aan bij bredere trends in de sector, zoals de groei van e-commerce en de vraag naar levering op dezelfde dag. Omdat consumenten steeds meer verwachten van snelle en foutloze leveringen moeten magazijnen innoveren om concurrerend te blijven. Geautomatiseerde order picking versnelt niet alleen het fulfilmentproces maar vergroot ook de schaalbaarheid zodat magazijnen piekperioden in de vraag kunnen verwerken met minimale onderbrekingen (Winkelhaus et al., 2021).

Flexibiliteit en schaalbaarheid worden daarom belangrijke criteria bij het selecteren van automatiseringsoplossingen. Tegelijkertijd moeten bedrijven rekening houden met het risico op technologische veroudering waarbij nieuwe systemen mogelijk niet snel genoeg kunnen inspelen op toekomstige eisen of innovaties. De implementatie van automatisering in magazijnen biedt aanzienlijke

voordelen maar vereist een weloverwogen aanpak om kosten, integratiecomplexiteit en menselijke factoren in balans te brengen. Het succes van magazijnautomatisering hangt af van een strategische visie, waarbij flexibiliteit en innovatie centraal staan in het ontwerp en de uitvoering van logistieke processen (Van Geest et al., 2021). De vraag naar efficiënte magazijnen heeft al decennialang een duidelijke en directe relatie met zowel economische ontwikkelingen als veranderende klantverwachtingen. In periodes van economische groei stijgt de behoefte aan magazijn capaciteit en snelle verwerkingstijden, terwijl in economisch uitdagende tijden, zoals een paar jaar geleden bij covid-19, de nadruk meer ligt op kostenbesparingen en operationele efficiëntie. Deze dynamiek bevestigt de cruciale rol van magazijnen in het creëren van waarde binnen de supply chain.

De just-in-time (JIT) benadering heeft de marktdynamiek fundamenteel veranderd door een verschuiving te veroorzaken van grote bulkorders naar kleinere, diverse bestellingen (Goetschalckx & Ashayeri, 1989). Deze ontwikkelingen hebben directe gevolgen voor verschillende aspecten van magazijnbeheer en logistieke processen. De productiviteit neemt toe doordat geavanceerde order picking systemen en automatiseringstechnologieën zorgen voor een efficiëntere verwerking van kleinere orders. Dit leidt tot kortere doorlooptijden, een vermindering van het aantal fouten en een algemene verbetering van de operationele efficiëntie binnen magazijnen. Daarnaast wordt flexibiliteit steeds belangrijker, aangezien magazijnen en distributiecentra zich snel moeten kunnen aanpassen aan veranderende vraagpatronen. Fluctuerende ordervolumes en wisselende productassortimenten vereisen een dynamische aanpak waarbij flexibele systemen en adaptieve technologieën een cruciale rol spelen. Hierdoor kunnen bedrijven niet alleen beter inspelen op marktveranderingen, maar ook efficiënter omgaan met piekbelastingen en seizoensgebonden schommelingen (Ellithy et al., 2024). Mass customization wordt steeds meer de standaard in de industrie, waarbij bedrijven gepersonaliseerde producten kunnen leveren zonder de schaalvoordelen van massaproductie te verliezen. Deze trends dwingen de logistieke sector om automatisering en prestaties te optimaliseren, aangezien verkorte doorlooptijd cruciaal is om concurrerend te blijven. Volgens Yamazaki et al. (2017) is er wereldwijd een groeiende vraag naar geavanceerde automatiseringsoplossingen om deze uitdagingen het hoofd te bieden. Door geautomatiseerde processen en intelligente orderverwerkingssystemen in te zetten, wordt het mogelijk om maatwerk op grote schaal efficiënt en kosteneffectief aan te bieden (Ellithy et al., 2024). Door deze marktontwikkelingen zijn productlevenscycli verkort en zijn automatiseringsstrategieën geëvolueerd van grootschalige productiesystemen naar flexibele systemen die kleine, gevarieerde volumes kunnen verwerken (Jovane et al., 2003).

1.2 Onderzoeksvragen

1.2.1 Centrale onderzoeksvraag

In deze masterproef wordt gezocht naar een antwoord op de volgende centrale onderzoeksvraag:

“Wat zijn de verschillende types van automatisering die momenteel beschikbaar zijn voor order picking, en welke processen ondersteunen ze?”

Het doel is om een volledig overzicht te geven van de automatiseringstechnologieën die in magazijnen worden toegepast en de specifieke processen die ze optimaliseren. Hierbij zal onderzocht worden hoe de inzet van automatisering het werk in magazijnen beïnvloedt, welke technologieën het meest geschikt zijn voor bepaalde magazijnprocessen en welke voordelen en beperkingen elk type automatisering met zich meebrengt. Om een gestructureerd antwoord te formuleren op de centrale onderzoeksvraag, werden enkele deelvragen opgesteld. Deze worden besproken in de volgende sectie.

1.2.2 Deelvragen

Deelvraag 1: Wat zijn de verschillende stappen binnen het order picking proces in magazijnen, en hoe worden deze momenteel uitgevoerd?

Deze vraag richt zich op het identificeren en beschrijven van de stappen in dit proces, zoals order picking, navigatie door het magazijn, het daadwerkelijk picken van de producten en kwaliteitscontrole. Daarnaast wordt er onderzocht welke methoden en hulpmiddelen momenteel in de praktijk worden gebruikt. Dit geeft een basis om automatiseringsmogelijkheden en verbeterpunten binnen het proces te analyseren.

Deelvraag 2: Hoe worden verschillende automatiseringstechnologieën ingezet in diverse magazijnprocessen?

Deze deelvraag richt zich op het identificeren van de diverse soorten automatisering en hun specifieke toepassingen binnen magazijnen. Automatisering kan bijvoorbeeld worden gebruikt in order picking, voorraadbeheer en verzending. Er wordt een overzicht gemaakt van technologieën en daarbij wordt geanalyseerd welke processen deze technologieën het meest ondersteunen en hoe ze de operationele efficiëntie verhogen.

Deelvraag 3: Hoe beïnvloeden verschillende typen automatiseringstechnologieën (zoals pick-to-light, autonome mobiele robots en voice picking) de snelheid van order picking?

Deze vraag onderzoekt de impact van verschillende automatiseringstechnologieën op de prestaties van het order picking proces, met name op het gebied van snelheid en nauwkeurigheid. Het doel is om een overzicht te bieden van de verschillende technologieën en te bepalen welke technologieën het meest geschikt zijn voor de specifieke magazijnomgevingen. Daarnaast gaan we ook naar de voordelen en beperkingen kijken van deze technologieën.

Deelvraag 4: Welke factoren bepalen de keuze voor een specifiek type automatisering in magazijnen?

De keuze voor een automatiseringsoplossing wordt beïnvloed door verschillende factoren, zoals de aard van de goederen, de magazijn grootte en de kosten-batenanalyse van de technologie. In deze deelvraag wordt besproken hoe bedrijven beslissen welk type automatisering het meest geschikt is voor hun specifieke situatie en welke factoren hierin doorslaggevend zijn. Er wordt gekeken naar operationele en economische overwegingen die de keuze voor een automatiseringstechnologie sturen.

Deelvraag 5: Welke trends en innovaties zijn op dit moment het meest bepalend in magazijnautomatisatie?

Technologische ontwikkelingen gaan snel en hebben een grote invloed op de automatiseringsmogelijkheden in magazijnen. Deze deelvraag richt zich op recente trends, zoals het gebruik van kunstmatige intelligentie, machine learning en het Internet of Things (IoT) binnen magazijnen. Verder worden de laatste innovaties op het gebied van robotica en autonome systemen besproken evenals hun potentieel om magazijnprocessen efficiënter te maken. Hierbij wordt gekeken naar innovaties die zich nog in de ontwikkelingsfase bevinden maar veel potentie tonen, zoals geavanceerde AI-toepassingen, collaboratieve robots (cobots) en vergaande automatisering van besluitvormingsprocessen.

Deelvraag 6: Welke uitdagingen ervaren bedrijven bij de implementatie van automatisatie in hun magazijnen, en welke oplossingen worden in de literatuur voorgesteld?

De implementatie van automatisering kan gepaard gaan met uitdagingen zoals hoge initiële investeringskosten, technologische complexiteit en weerstand van personeel. In deze deelvraag wordt onderzocht welke obstakels bedrijven ondervinden bij het implementeren van automatiseringstechnologieën en welke oplossingen in de literatuur worden aangereikt om deze uitdagingen te overwinnen. Er wordt aandacht besteed aan zowel technische als organisatorische aspecten.

De antwoorden op deze deelvragen zullen bijdragen aan een breed en diepgaand begrip van magazijnautomatisering, de keuzes die hierbij gemaakt worden en de mogelijke toekomstontwikkelingen.

1.3 Methodologie

Deze masterproef maakt gebruik van kwalitatief onderzoek om een overzicht te bieden van de literatuur met betrekking tot het onderzoeksonderwerp "automatisatie binnen magazijnen. De thesis bestaat uit twee grote delen: de literatuurstudie en het empirisch onderzoek.

Het eerste deel omvat de literatuurstudie. De literatuurstudie houdt een uitgebreide verkenning van bestaande kennis en eerder onderzoek met betrekking tot magazijnautomatisatie in. Deze verkenning is gebaseerd op wetenschappelijke artikelen afkomstig uit diverse databases, zoals de Universiteitsbibliotheek van UHasselt, Google Scholar en Web of Science. De link wordt gelegd naar de centrale onderzoeksvraag en deelvragen van het onderzoek. De studie behandelt de verschillende types automatiseringstechnologieën die beschikbaar zijn voor de magazijnen en de factoren die van invloed zijn op de keuze voor specifieke automatiseringsoplossingen. Daarnaast worden ook de belangrijkste trends en innovaties in magazijnautomatisatie besproken.

Gebaseerd op de theoretische kennis verzameld in de literatuurstudie, wordt nadien een empirisch onderzoek uitgevoerd. Dit deel van het onderzoek is gericht op het verkrijgen van actueel inzicht in de

toepassing van automatisering in magazijnen. Voor deze masterproef is gekozen voor kwalitatief empirisch onderzoek, specifiek door middel van diepte-interviews met magazijnmanagers en andere belanghebbenden in de logistieke sector. Deze stakeholders zijn werkzaam bij diverse bedrijven die actief zijn in magazijnbeheer en logistiek. De interviews zijn bedoeld om dieper in te gaan op de praktijkervaringen met automatisering in magazijnen, waarbij de huidige uitdagingen en mogelijke oplossingen van automatisatie worden besproken. Door de input van experts in de sector wordt een bredere kijk verkregen op aspecten van magazijnautomatisatie die mogelijk niet in de literatuur aan bod komen.

Daarna worden de resultaten van de diepte-interviews besproken en worden er conclusies getrokken door de antwoorden van verschillende betrokken partijen te vergelijken. Dit laat toe om patronen en trends te identificeren en relevante conclusies te formuleren met betrekking tot de toepassing van automatisering in magazijnen.

Het laatste gedeelte van deze masterproef bestaat uit de algemene conclusies en aanbevelingen. Het hoofddoel van dit onderzoek is het bieden van inzicht in hoe magazijnen hun processen kunnen optimaliseren door middel van automatisering.

2 De literatuurstudie

De literatuurstudie begint met een bespreking van de functies en het belang van magazijnen gevolgd door een analyse van opslagstrategieën. Vervolgens wordt in sectie 2.4 ingegaan op order picking en de invloed hiervan op magazijnprestaties samen met de optimalisatiebenaderingen. Daarna worden verschillende order pickingsystemen geanalyseerd in sectie 2.5 en de invloed van magazijnlay-out op efficiëntie besproken. Daarna kijken we in sectie 2.9 hoe magazijnautomatisering geplaatst wordt in de bredere context van bedrijfsgroei tot marktontwikkelingen. Dit wordt aangevuld met een overzicht van automatiseringstechnologieën in sectie 2.11 en hun toepassingen waarbij ook de balans tussen automatisering en flexibiliteit wordt afgewogen.

2.1 Functies en belang van magazijnen en distributiecentra

Magazijnen en distributiecentra spelen een cruciale rol in de logistieke keten door producten veilig en gereed op te slaan totdat een klantorder binnenkomt. Magazijnen worden gebruikt voor de opslag of buffering van verschillende producttypen (grondstoffen, halffabricaten en afgewerkte producten) tussen de punten van oorsprong en consumptie (De Koster et al., 2007; Ozturkoğlu & Hoşer, 2019). Ze dragen significant bij aan het juist verlopen van de logistieke operaties van een organisatie en ze zijn essentieel voor het tijdig bedienen van klanten. Processen zoals goederenontvangst, opslag, order picking en verzending zijn steeds belangrijker geworden. De verschillende benaming van een magazijn hangt af van de hoofdfunctie van het magazijn. Magazijnen richten zich primair op opslag en buffering. Distributiecentra combineren opslag met uitgebreide distributieactiviteiten. Daarnaast bestaan nog overslag, crossdock- en platformcentra, hier worden producten zonder langdurige opslag direct verwerkt en gedistribueerd (De Koster et al., 2007).

Magazijnen vervullen strategische functies binnen het bedrijf maar brengen hoge investeringen en operationele kosten met zich mee zoals bouwkosten, apparatuurskosten en arbeidskosten. Deze strategische functies kunnen heel breed gaan en hangen ook af van welk type magazijn de organisatie wil hanteren. De transportefficiëntie kan worden verhoogd door gecombineerde zendingen of volle containerladingen wat leidt tot kostenbesparingen en een duurzamer logistiek proces. Daarnaast kunnen productiebesparingen worden gerealiseerd door een make-to-stock productiebeleid waarbij producten op voorraad worden gehouden om schommelingen in de vraag beter op te vangen (De Koster et al., 2007).

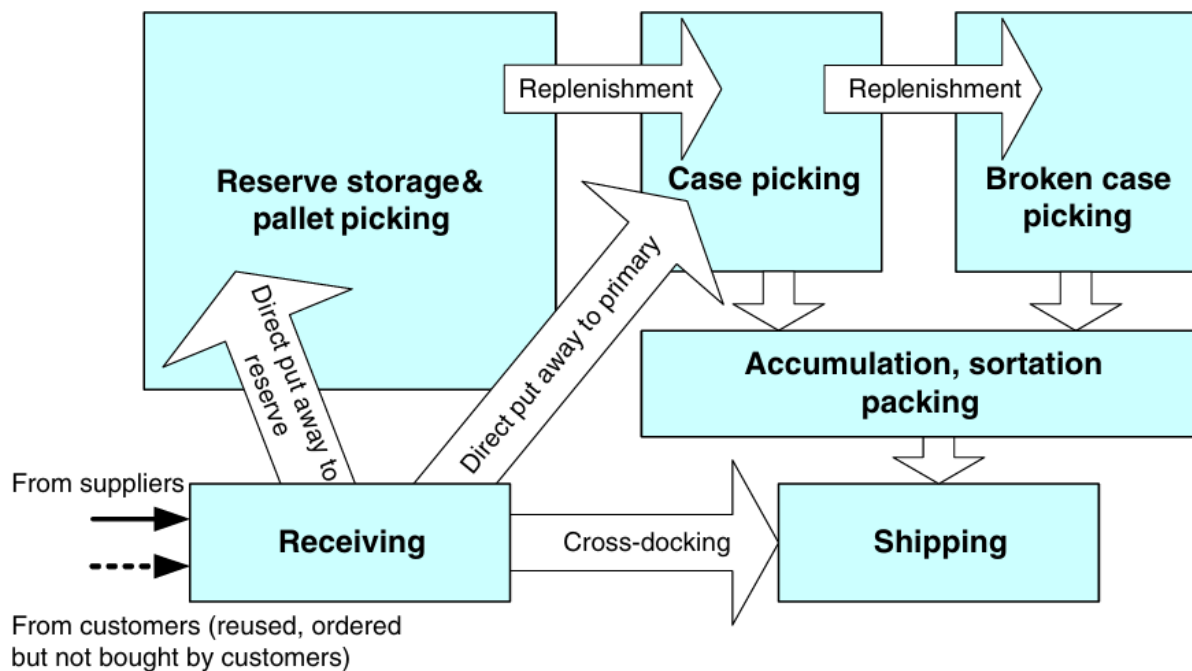
Als een efficiënt voorraadbeheer wordt toegepast, kunnen fluctuaties in de vraag en seizoenspatronen opgevangen worden wat de leverbetrouwbaarheid verhoogt. Verder helpt logistiek bij het overbruggen van tijd- en ruimteverschillen tussen producenten en klanten wat essentieel is voor een soepel verlopende supply chain (De Koster et al., 2007). Een optimale balans tussen kosten en serviceniveau draagt bij aan kostenoptimalisatie binnen logistieke operaties. Dit kan onder meer worden bereikt door

het ondersteunen van JIT programma's voor leveranciers en klanten waardoor overmatige voorraden worden vermeden en de kapitaalkosten dalen (Lambert et al., 1998). Bovendien maakt productconsolidatie het mogelijk dat klanten bestellingen ontvangen met meerdere orders wat efficiëntie en klanttevredenheid verhoogt. Ook omgekeerde logistiek wordt gefaciliteerd door tijdelijke opslag van te recyclen of retourmaterialen wat bijdraagt aan duurzaamheidsdoelstellingen (Lambert et al., 1998). De behoefte om aan efficiënter magazijnbeheer te doen wordt versterkt door de opkomst van e-commerce. De noodzaak van korte reactietijden is onvermijdelijk geworden door de stijgende vraag naar snelle leveringen in onlinehandel. Een van de meest kritische prestatie-indicatoren is de interne doorlooptijd waarbij order picking de grootste impact heeft op zowel responsietijden als klanttevredenheid (Ozturkoğlu & Hoşer, 2019). Tot slot wordt de efficiëntie van goederenstromen verder verbeterd door cross-docking waarbij producten direct naar uitvoer worden verplaatst zonder langdurige opslag wat leidt tot kortere doorlooptijden en lagere opslagkosten (De Koster et al., 2007). De evolutie in de logistieke sector en de complexiteit van magazijnbeheer hebben geleid tot een groeiende behoefte aan geautomatiseerde oplossingen. Binnen deze context neemt order picken een centrale plaats in, aangezien dit proces vaak de grootste invloed heeft op zowel de operationele efficiëntie als de kostenstructuur van het magazijn. Toch is order picking slechts één van de vele processen binnen het bredere geheel van magazijnactiviteiten. Om de automatiseringsmogelijkheden van order picking goed te begrijpen, is het noodzakelijk eerst het volledige logistieke proces binnen een magazijn te kaderen. In de volgende sectie wordt daarom een overzicht gegeven van de belangrijkste functionele zones en processen binnen een magazijn waarin ook de plaats van order picking wordt gesitueerd.

2.2 Goederenontvangst tot verzending

Figuur 1 illustreert de belangrijkste functionele zones binnen een magazijn. Deze zijn ontvangst, opslag, order picking, sortering en verzending. De logistieke activiteiten binnen een magazijn omvatten verschillende cruciale processen die bijdragen aan een efficiënte goederenstroom. Het begint met de ontvangst van goederen, waarbij producten worden gelost, gecontroleerd op voorraadniveaus en geïnspecteerd op afwijkingen om de kwaliteit te waarborgen (De Koster et al., 2007). Vervolgens vindt het overzetten en opslaan plaats wat interne transportbewegingen, ompakken en opslag in rekken of bakken omvat om de goederen op een georganiseerde en toegankelijke manier te beheren. Een essentieel proces binnen magazijnoperaties is order picking, waarbij producten uit opslaglocaties worden opgehaald voor klantorders. Dit gaat hand in hand met sorteren en groeperen, waarbij orders worden ingedeeld en klaargemaakt voor verzending om een snelle en foutloze levering te garanderen (Tompkins et al., 2010). Daarnaast kan cross-docking worden toegepast waarbij goederen direct van ontvangst naar verzending worden verplaatst zonder langdurige opslag, wat de doorlooptijden verkort en opslagkosten minimaliseert. Binnen het proces van order picking spelen verschillende activiteiten en beslissingsniveaus een rol. Dit begint met de clustering en planning van klantorders. Daarnaast is de toewijzing van voorraadlocaties aan orderregels van belang zodat producten snel en logisch kunnen worden gepickt. De volgende stap betreft de vrijgave van orders naar de werkvloer wat bepaalt wanneer en door wie een order wordt verwerkt. Ten slotte omvat het proces de daadwerkelijke verzameling en

afvoer van producten waarbij orders nauwkeurig worden samengesteld en gereed worden gemaakt voor verzending naar de klant (De Koster et al., 2007).



Figuur 1 Typische warehouse functies en flows (De Koster et al., 2007)

Magazijnbeheer kan onderverdeeld worden in twee fasen: de ontwerpfase en de operationele fase. Tijdens de ontwerpfase worden strategische beslissingen genomen op basis van de klantvraag en de orderverwerkingsstrategie van een organisatie. Deze beslissingen gaan over de magazijn grootte, de layout, de keuze voor opslagapparatuur en de personeelsplanning. Daarna kan er overgeschakeld worden naar de operationele fase waarin de tactische beleidsmaatregelen, zoals opslag- en order pickingstrategieën worden ingezet om de klantorders op een efficiënte en kosteneffectieve manier af te handelen (Chen et al., 2010).

Het primaire doel van magazijnbeheer is zoeken naar de meest efficiënte manier om de functionaliteit van het magazijn in de toeleveringsketen te garanderen, of het nu gaat om de basisdistributie of om andere innovatieve activiteiten die waarde toevoegen. Gedreven door de constante vraag van de klant naar snellere, betere en goedkopere diensten wordt de efficiëntie van magazijnoperaties cruciaal in de huidige concurrerende markt. Na de leveringsmelding van een leverancier kan het magazijnproces beginnen. Na de aankomst van de goederen en de inspectie op enige defecten of tekorten kunnen de goederen in stock genomen en opgeslagen worden in het magazijn (Chen et al., 2010). Efficiëntie binnen de verschillende magazijnprocessen is van groot belang om doorlooptijden en kosten te verminderen. Aangezien order picking een van de meest tijdrovende en arbeidsintensieve processen is, zoeken bedrijven naar oplossingen om deze activiteiten te optimaliseren. Om deze oplossingen correct te kunnen implementeren moeten bedrijven een doordachte opslagstrategie hanteren. In het volgende hoofdstuk

wordt er beschreven hoe de verschillende opslagstrategieën een impact hebben op de magazijnprocessen.

2.3 Opslagstrategieën binnen magazijnen

Magazijnen hanteren doorgaans vier algemene opslagstrategieën om opslaglocaties effectief te beheren: willekeurige opslag, specifieke opslag, omzet gebaseerde opslag en klasse gebaseerde opslag. Een correct gekozen opslagstrategie heeft een directe invloed op de efficiëntie van order picking en andere magazijnprocessen.

2.3.1 Willekeurige opslag en specifieke opslag

Bij willekeurige opslag wordt elke opslaglocatie met gelijke waarschijnlijkheid toegewezen aan een product, wat resulteert in een uniforme verdeling van producten. Ze koppelen een opslaglocatie willekeurig aan een product, zonder rekening te houden met een bepaalde factor (Petersen, 1997). Dit beleid is sterk afhankelijk van geautomatiseerd voorraadbeheer zoals een WMS. De effectiviteit van deze opslag strategie zal bepaald worden door de kwaliteit van het WMS. Het WMS kan op basis van beschikbaarheid en optimalisatie van looproutes bepalen waar het artikel het best kan worden opgeslagen (Chuang et al., 2012). De willekeurige aard van deze strategie is wel vrij beperkt omdat de werknemers producten vaak op de dichtstbijzijnde beschikbare locaties stockeren (Ozturkoğlu & Hoşer, 2019). In tegenstelling tot willekeurige opslag kunnen organisaties bij specifieke opslag kiezen voor een beleid dat de zoek- en reistijd vermindert (Chuang et al., 2012). In sommige magazijnen wordt gebruikt gemaakt van vaste opslaglocaties waarbij specifieke producten telkens op een vooraf bepaalde plaats worden opgeslagen. Deze strategie vergemakkelijkt het werk voor werknemers aangezien ze door herhaling en ervaring vertrouwd raken met de locatie van bepaalde goederen. Er is aangetoond dat een specifieke opslagstrategie de opslagbenutting kan verminderen in vergelijking met de willekeurige opslag (Bartholdi & Hackman, 2018).

2.3.2 Omloopsnelheid en klasse gebaseerde opslag

Naast de algemene opslagmethoden zijn er opslag strategieën die op basis van omloopsnelheid en klasse werken. Bij een omloopsnelheid-gebaseerde aanpak worden producten met de hoogste omloopsnelheid toegewezen aan locaties die zich het dichtst bij de pick-&-deposit-punten bevinden. Dit minimaliseert de reistijd van order pickers en verhoogt de snelheid van het order pickingproces (Chuang et al., 2012). Aangezien de vraag naar producten in de loop van de tijd kan variëren, kunnen magazijnmanagers dynamische opslaglocaties toewijzen aan specifieke producten, afhankelijk van de verwachte activiteit en vraagpatronen (Ozturkoğlu & Hoşer, 2019). Een andere benadering is klassegebaseerde opslag, waarbij opslaglocaties worden verdeeld in verschillende klassen op basis van hun afstand tot het pick-&-deposit-punt. Binnen elke klasse worden producten willekeurig toegewezen aan beschikbare opslaglocaties (Chuang et al., 2012). Dit model biedt een balans tussen efficiëntie en flexibiliteit omdat het producten groepeerd op basis van hun verwachte pickfrequentie. Het systeem heeft een zekere mate van willekeur in de exacte positionering van items (Yener & Yazgan, 2019). Dit helpt niet alleen bij het

verbeteren van de opslagbenutting maar ook bij het verkorten van de order picktijd (Petersen et al., 2004). Producten met een hoge omloopsnelheid krijgen strategische posities toegewezen dicht bij de pickzones terwijl producten met een lagere omloopsnelheid flexibel worden geplaatst binnen toegewezen klassen. Dit zorgt voor een dynamisch en aanpasbaar opslagbeheer dat zich kan aanpassen aan veranderende vraagpatronen en magazijnbehoeften (Ozturkoğlu & Hoşer, 2019). Door het gebruik van opslagstrategieën die passen bij de bedrijfsstructuur kan de reistijd van het order picken reduceren. Deze opslagstrategieën kunnen gecombineerd worden met automatisering om de efficiëntie verder te verhogen. In het volgende hoofdstuk wordt er gekeken naar de impact op de magazijnprestaties van order picking en welke ondersteunende technologieën er worden gebruikt.

2.4 Innovaties in order picking technologieën

Order picking als proces heeft een grote invloed op de responsiviteit van een magazijn. Innovaties zoals pick by voice, Radio Frequency IDentification (RFID)-technologie en pick by light systemen hebben over de jaren de prestaties binnen de supply chain verbeterd (De Koster et al., 2007; Dallari et al., 2009). Om order picking efficiënter te maken worden deze technologieën ingezet. Order pickers kunnen een headset of een slimme bril dragen met een AR-compatibele lens die informatie over de fysieke omgeving projecteert. Bij pick by vision ontvangt de operator via het toestel gegevens over de opslaglocatie en de benodigde producten. De informatie wordt doorgestuurd via het WMS, er zijn verschillende gradaties van de informatie in dit systeem. Er kan enkel tekstuele informatie weergegeven worden of het systeem kan de picker zijn route beschrijven om alle artikelen van het klantorder te verwerken (Reif & Günthner, 2009). Pick by voice ondersteunt het order picken door audio- en spraakopdrachten te gebruiken. Bij dit soort picken draagt de picker ook een headset. Het systeem wisselt continu gegevens uit met het WMS. Het systeem vertaalt de benodigde informatie voor het order picken naar gesproken berichten. De order picker moet bij iedere pick bevestigen door de naam en hoeveelheid van het product te herhalen (De Vries et al., 2016). Pick by light gebruikt lichtsignalen om de picker te begeleiden doorheen het order. Om deze manier van picken juist te laten verlopen moeten elke opslaglocatie uitgerust worden met lampen en knoppen of sensoren. De lamp zal aangaan bij de bepaalde locatie en er kunnen kleine schermen bijstaan om de hoeveelheid weer te geven. Nadat de order picker de benodigde artikelen heeft genomen moet hij op de bijhorende knop duwen om dit te bevestigen. De lampen gaan hierna uit en de picker kan verder gaan met het klantorder naar de volgende aangegeven opslaglocatie. De arbeider heeft dus flexibiliteit in het kiezen van de pickvolgorde (Haase & Beimbom, 2017). Deze systemen zijn ook handsfree waardoor de operator zich beter kan concentreren op het pickingproces. De nauwkeurigheid van het proces wordt verhoogd door de directe signalisaties. Bij deze systemen is er een noodzaak aan directe uitwisseling van gegevens tussen het WMS en de order picker wat leidt tot een betere opvolging. Het WMS zorgt ervoor dat de voorraadniveaus automatisch worden bijgewerkt (Haase & Beimbom, 2017). Tabel 1 biedt een overzicht van de voor- en nadelen van de verschillende picking systemen ten opzichte van traditionele, op papier gebaseerde manier.

Tabel 1 Voor- en nadelen van picking systemen (Haase & Beimborn, 2017)

Manier picken	Voordelen	Nadelen
Papier gebaseerd picken	-Gemakkelijke en goedkope invoering -Beperkte training vereist	-Tijdrovend door langere zoektijden van opslaglocaties -Maakt geen real-time gegevensuitwisseling mogelijk. WMS wordt niet bijgewerkt voordat de picking route is voltooid.
Pick by light	-Handsfree order picking	-Hogere kost bij installatie en aanpassingen -1 picker kan in een bepaalde zone werken
Pick by voice		-Moeilijk inzetbaar bij luide omgeving -Minder interactie tussen collega's
Pick by vision		-Minder interactie tussen collega's

Daarnaast bestaat een RFID-technologie die kan ingezet worden. Deze maakt gebruik van een gegevenstag die reageert op radiogolven die worden uitgezonden door de RFID-lezer. Deze tag kan informatie verzenden, verwerken en opslaan. Hoewel deze technologie duurder is dan de barcode-technologie zijn bedrijven bereid om deze techniek toe te passen om de nauwkeurigheid van gegevensverwerking te verbeteren. Bij RFID-technologie worden de gegevens automatisch verwerkt (Poon et al., 2009).

De manier hoe order picking wordt georganiseerd heeft directe gevolgen voor de prestaties van een distributiecentrum en de gehele supply chain. Er kunnen onnauwkeurigheden, onvolledige leveringen en vertragingen ontstaan tussen het moment van ordervrijgave en de levering bij de klant. Aan de andere kant is er ook ruimte voor verbetering. Innovatieve oplossingen hebben geleid tot productiviteitsniveaus tot wel 1000 picks per persoon per uur (De Koster et al., 2007). Er worden continu nieuwe problemen en optimalisatiemodellen gevonden. Maar de kloof tussen theorie en praktijk blijft groot aangezien niet alle nieuwe order picking methoden uitgebreid zijn onderzocht. Daarnaast zijn de optimale combinaties van magazijnlay-out, opslagbeleid, orderclustering, ordervrijgavemethoden, routeringsstrategieën en orderaccumulatie slechts beperkt onderzocht (De Koster et al., 2007). De besproken technologische innovaties zorgen voor een vermindering van de doorlooptijd en dragen bij tot lagere kosten. Daarnaast bepaalt de keuze van welk type Order Picking Systeem (OPS) wordt ingezet de effectiviteit van het magazijn. In volgend hoofdstuk wordt er een beschrijving van de verschillende OPS gemaakt om de verschillen tussen de OPS te bepalen.

2.5 Analyse van de verschillende OPS

Om de verschillende types OPS in beeld te brengen kunnen bedrijven deze opdelen in vijf hoofdtypes. Deze indeling richt zich op operationeel beleid en niet enkel op technologie. Deze indeling bouwt verder op de eerdere indeling van De Koster et al. (2007) en onderscheidt 5 types OPS. Het eerste type en het

simpelste is het picker-to-parts-systeem, hier bewegen order pickers zich doorheen het magazijn om producten te verzamelen en klantorders te vervolledigen en af te geven aan het pick-&-deposit-punt. Een ander type is het pick-to-box-systeem, hier worden de producten rechtstreeks naar verzameldozen gebracht, dit wordt vaak ondersteund door licht- of stem gestuurde technologieën. Het derde type is pick-and-sort-systeem, producten worden verzameld en vervolgens gesorteerd op basis van klantorder. Bij het parts-to-picker-systeem worden producten automatisch naar de order picker gebracht waardoor de order picker zich niet hoeft te verplaatsen. Het laatste type is het volledig geautomatiseerd order pickingsysteem. Het gehele proces van order picking tot transport verloopt zonder menselijke tussenkomst. Deze indeling is gebaseerd op vier kernbeslissingen die bepalend zijn voor de werking van een OPS. Wie verzamelt de goederen, wie beweegt door het magazijn, worden transportbanden gebruikt en welk verzamelbeleid wordt toegepast. Het automatiseringsniveau neemt toe naarmate systemen opschuiven van een picker-to-parts-systeem naar een volledig geautomatiseerd order pickingsysteem. Dit impliceert dat manuele systemen doorgaans flexibeler maar arbeidsintensiever zijn terwijl geautomatiseerde systemen hogere efficiëntie en nauwkeurigheid bieden maar gepaard gaan met hogere investeringskosten en technische complexiteit (Dallari et al., 2009).

Het picker-to-parts-systeem is het meest gangbare order pickingsysteem in magazijnen en wordt beschouwd als het basismodel voor order picking (De Koster et al., 2007). In dit systeem bewegen order pickers zich door de gangpaden, te voet of met een heftruck, om artikelen te verzamelen. De verzameling kan plaatsvinden op basis van twee methoden. Bij single-order picking verwerkt de order picker per verzamelronde slechts één enkele klantorder. Een alternatieve methode is batch picking, waarbij meerdere klantorders tegelijk worden samengevoegd in één verzamelronde. Dit kan de efficiëntie verhogen door het aantal loopbewegingen per order te reduceren, vooral wanneer meerdere order overlappende artikelen bevatten. De efficiëntie van het order pickproces kan verhoogd worden door het toepassen van geavanceerde routingsalgoritmen, een strategische toewijzing van artikelen aan opslaglocaties (item allocation) en het gebruik van papierloze orderpicksystemen zoals voice picking of pick-to-light (Dallari et al., 2009).

Het pick-to-box-systeem, ook bekend als het pick-and-sort-systeem, maakt gebruik van zonegebaseerde order picking. In dit systeem wordt het order picking gebied opgedeeld in meerdere zones, die elk worden beheerd door een of meer order pickers. Orders worden verwerkt via een transportband die dozen met artikelen door de verschillende zones transporteert. Elk van deze dozen vertegenwoordigt een (gedeeltelijke) klantorder en wordt in de opeenvolgende zones verder aangevuld (Le-Duc & De Koster, 2005). Belangrijke kenmerken van dit systeem zijn progressieve zonering en efficiëntievoordelen. Bij progressieve zonering worden klantorders sequentieel samengesteld waarbij elk artikel in de juiste zone aan de order wordt toegevoegd. Hierdoor is geen extra sortering nodig aan het einde van het proces omdat de order al volledig in een doos is samengebracht. De efficiëntievoordelen worden bereikt door een verminderde reistijd omdat order pickers in hun toegewezen zone blijven. Natuurlijk zijn er wel enkele uitdagingen aan het systeem verbonden. Om knelpunten te voorkomen moet de werklastverdeling over de verschillende zones zorgvuldig gebalanceerd worden. Ongelijk verdeelde

werklast kan leiden tot vertragingen in bepaalde zones, waardoor de orderdoorstroming wordt verstoord. Daarnaast kunnen grotere orders de complexiteit verhogen omdat meer dozen tegelijkertijd door het magazijn circuleren. Dit kan leiden tot congestie en een verminderde efficiëntie. Het pick-to-box-systeem is geschikt voor kleine artikelen met middelgrote ordervolumes en kleine ordergroottes. Dit systeem wordt voornamelijk gebruikt in omgevingen met hoge verwerkingsvolumes en korte orderdoorlooptijden zoals e-commerce en retail met verschillende producten (Dallari et al., 2009).

Het pick-and-sort-systeem is een efficiënte order pickingmethode waarbij artikelen in bulk worden verzameld en vervolgens automatisch worden gesorteerd per klantorder. Dit systeem minimaliseert de reistijd van order pickers doordat zij zich niet hoeven te richten op afzonderlijke orders maar in plaats daarvan artikelen in grote hoeveelheden verzamelen (Dallari et al., 2009). Order pickers verzamelen artikelen in batchvorm en plaatsen deze op een transportband die de artikelen naar een geautomatiseerd sorteersysteem leidt. Hier wordt de eindbestemming bepaald door een computersysteem en worden ze toegewezen aan een specifiek klantorder. Het pick-and-sort-systeem werkt met pickgolven waarbij alle orders in een batch volledig worden gesorteerd en gepickt voordat de volgende golf wordt vrijgegeven. De gemiddelde batchgrootte in dit systeem bedraagt minstens 20 klantorders per pickgolf wat de efficiëntie aanzienlijk verhoogt (Le-Duc & De Koster, 2005). Er kan een hogere productiviteit bereikt worden dan bij een traditioneel picker-to-parts systeem doordat de order pickers minder reistijd hebben. Bij het ontwerpen van een pick-and-sort-systeem moet veel aandacht worden besteed aan de afweging tussen efficiëntie bij het order picken en efficiëntie bij het verpakken (Russell & Meller, 2003). Daarnaast moet de grotere afweging tussen de kapitaalkosten voor het implementeren van een geautomatiseerde sorteerder en de arbeidsbesparing die dit oplevert zorgvuldig worden gemaakt. Deze oplossing lijkt de voorkeur te verdienen bij een hoge overlap van orderlijnen, een hoge uitstroom en afwezigheid van breekbare producten (Dallari et al., 2009).

Het laatste systeem is het parts-to-picker-systeem, door automatische aanvoer van producten naar verzamelstations waar order pickers de benodigde artikelen selecteren. Dit is een geautomatiseerde order pickingmethode die de looptijd van order pickers minimaliseert en de opslagdichtheid binnen een magazijn verhoogt. Het systeem maakt gebruik van verschillende geautomatiseerde opslag- en ophaalsystemen (AS/RS) (Manzini et al., 2006). Het aantal benodigde arbeidsuren kan aanzienlijk verminderd worden doordat de order pickers niet fysiek door het magazijn hoeven te lopen om producten te halen. Door het elimineren van gangpaden en het gebruik van geautomatiseerde opslagsystemen kan de opslagdichtheid worden verhoogd. Dit zorgt ervoor dat meer goederen kunnen worden opgeslagen binnen een kleinere oppervlakte waardoor er efficiënter gebruik gemaakt kan worden van de beschikbare ruimte. Enkele beperkingen en uitdagingen zijn te vinden in de toevoer van de artikelen. Omdat alle artikelen naar het verzamelstation worden getransporteerd kunnen er vertragingen optreden. Dit kan de productiviteit van het magazijn verlagen en wachttijden doen ontstaan bij de order pickers. In magazijnen waar het aantal orders sterk fluctueert kan dit systeem minder flexibel zijn dan het traditionele picker-to-parts-systeem. Snel wisselende vraagpatronen kunnen een uitdaging vormen omdat de verzamelstrategie niet eenvoudig kan worden aangepast. Het parts-to-picker-systeem is vooral

geschikt voor magazijnen met een groot aantal verschillende producten en relatief lage ordervolumes. Dit maakt het systeem ideaal voor sectoren zoals farmaceutische distributie, high-tech supply chains en magazijnen met specialistische producten, waar nauwkeurigheid en ruimtebenutting essentieel zijn (Dallari et al., 2009). Tabel 2 biedt een overzicht van de voor- en nadelen van elk systeem en voor welk type magazijn het kan geschikt zijn.

Tabel 2 Overzicht OPS-systemen

OPS-Systeem	Voordelen	Uitdagingen	Geschikt voor
Picker-to-parts	Flexibel, eenvoudig te implementeren, lage investeringskosten	Hoge reistijden, lagere productiviteit	Magazijnen met diverse producten en middelgrote ordervolumes
Pick-to-box	Lage reistijd, zonegebaseerde efficiëntie	Werklastverdeling tussen zones, hogere complexiteit bij grote orders	Magazijnen met veel kleine artikelen en gemiddelde ordergroottes
Pick-and-sort	Hoge productiviteit, efficiënte sortering	Hoge kapitaalinvestering in sorteersystemen	Magazijnen met grote batchgroottes en veel overlappende orderregels
Parts-to-picker	Lage arbeidskosten, efficiënte ruimtebenutting	Beperkte flexibiliteit, knelpunten in aanvoer	Magazijnen met veel producten en lage uitstroomvolumes

2.6 Structuur van het order pickingproces

Dagelijks komen klantorders binnen waarvoor er een order pickopdracht verstuurd wordt naar het magazijn (Chen et al., 2010). Klantorders bestaan uit meerdere orderregels waarbij elke regel een specifiek product en de bijbehorende hoeveelheid omvat (De Koster et al., 2007). Order pickers bewegen zich doorheen het magazijn en nemen de benodigde producten uit de verschillende delen van het magazijn volgens het toegepaste order pickingbeleid. Het order pickingbeleid is opgesteld om zo efficiënt mogelijk producten te verzamelen in reactie op de klantvraag. De snelheid en efficiëntie van het order picken wordt rechtstreeks beïnvloed door de manier van opslaan van goederen. Hiervoor moeten bedrijven een juiste combinatie zoeken tussen het pickingproces en hun opslagbeleid (Chen et al., 2010). De keuze voor een specifiek OPS heeft niet alleen invloed op de efficiëntie en nauwkeurigheid van het pickingproces. De keuze bepaalt ook hoe de magazijnstructuur en opslagbeleid opgebouwd worden.

Binnen magazijnen worden diverse order picking systemen toegepast, die variëren in de mate van automatisering. Traditionele manuele picker-to-part systemen vereisen dat order pickers zich door gangpaden bewegen om producten te verzamelen. Dit kan door producten handmatig uit rekken of

bakken te nemen en te verzamelen. Daarnaast kunnen heftrucks of kranen worden gebruikt voor het beheren van hoog opgeslagen goederen. Daartegenover staan geautomatiseerde systemen zoals conveyors, robots en Automated Storage and Retrieval Systems (AS/RS) die het order pickingproces efficiënter en sneller maken door menselijke handelingen te minimaliseren (Marchet et al., 2015). Volgens De Koster et al. (2007) en Marchet et al. (2015) vertrouwen de meeste magazijnen nog steeds op handmatige order picking, waarbij picker-to-part systemen het meest gangbaar zijn ondanks de opkomst van automatisering.

2.6.1 Het belang van efficiënte order picking

Het succes van OPS hangt niet alleen af van de gekozen technologie maar ook van de strategische en operationele beslissingen. Een van de belangrijkste doelstellingen van order pickingsystemen is het maximaliseren van het serviceniveau binnen de beperkingen van beschikbare middelen zoals arbeid, machines en kapitaal (Goetschalckx & Ashayeri, 1989). Factoren die dit serviceniveau beïnvloeden zijn onder andere de gemiddelde en variabele levertijd en de ordernauwkeurigheid en integriteit. Een directe relatie tussen order picking en serviceniveau is dat een snellere order picking leidt tot een kortere doorlooptijd waardoor orders sneller beschikbaar zijn voor verzending. Vertragingen kunnen ertoe leiden dat een order pas in een volgende verzendcyclus wordt verwerkt. Daarnaast verhogen korte pickingtijden de flexibiliteit waardoor last-minute wijzigingen in orders eenvoudiger kunnen worden doorgevoerd (Rouwenhorst et al., 2000). Bedrijven nemen beslissingen over het ontwerp en de controle van order pickingsystemen op verschillende niveaus, waarbij zowel tactische als operationele overwegingen een rol spelen. Op tactisch niveau worden langetermijnbeslissingen genomen die de fundamentele structuur en efficiëntie van het magazijn beïnvloeden (De Koster et al., 2007). Op operationeel niveau worden beslissingen genomen die gericht zijn op de dagelijkse uitvoering van order picking. Een van de belangrijkste aspecten is de routing van order pickers, waarbij efficiënte paden door het magazijn worden bepaald om reistijden te minimaliseren. Daarnaast omvat dit niveau ook het sorteren en de orderaccumulatie waarbij verzamelde producten worden gegroepeerd en klaargemaakt voor verzending (De Koster et al., 2007). Ondanks dat deze beslissingen onderling afhankelijk zijn, worden ze in de praktijk vaak sequentieel genomen. Dit betekent dat optimalisaties binnen één beslissingsgebied niet altijd in samenhang met andere factoren worden overwogen. Hierdoor kunnen sommige efficiëntievoordelen onbenut blijven (De Koster et al., 2007). Naast het nemen van strategische en operationele beslissingen is het ook belangrijk om picking processen continu te optimaliseren.

2.7 Optimalisatie van reistijd binnen order picking

Een van de grootste obstakels bij het verhogen van de efficiëntie binnen order picking is de picktijd. De order pickingtijd bestaat uit meerdere componenten waarbij reistijd een van de meest bepalende factoren is. Naast reistijd zijn er ook andere elementen die bijdragen aan de totale order pickingtijd, maar reistijd blijft doorgaans de dominante component (Dekker et al., 2004). Bartholdi & Hackman (2018) stellen dat reistijd een vorm van verspilde tijd is die geen directe waarde toevoegt aan het proces en daarom een belangrijke kandidaat is voor optimalisatie.

Binnen de wetenschappelijke literatuur over order picking worden twee belangrijke soorten reisafstanden onderscheiden. De eerste is de gemiddelde reisafstand van een order pickingtour (gemiddelde tourlengte) die bepaalt hoeveel afstand een orderpicker gemiddeld moet afleggen om een order te voltooien. De tweede is de totale reisafstand binnen een magazijn die de som is van alle afstanden die door order pickers worden afgelegd. Het minimaliseren van de gemiddelde reisafstand leidt direct tot een kortere totale reistijd wat de efficiëntie van order pickingsystemen aanzienlijk verhoogt (De Koster et al., 2007). Een andere essentiële factor bij het reduceren van de reisafstanden is het routeringsbeleid dat bepaalt in welke volgorde de artikels worden verzameld. Bij het routeringsbeleid is vaak het primaire doel om de totale reisafstand van alle order pickers in zijn totaal te verminderen. Een goed routeringsbeleid kan bijdragen tot het verkorten van de totale doorlooptijd van klantorders indien de order pickers met een constante snelheid opereren en er geen sprake is van congestie tussen de order pickers (Chen et al., 2010).

In de praktijk worden optimale routes nauwelijks toegepast omdat deze vaak te complex zijn en moeilijk te volgen voor menselijke werknemers. Om deze reden richten magazijnmanagers zich voornamelijk op intuïtieve heuristieken zoals S-shape routing, largest-gap routing, mid-point routing, return routing en aisle-by-aisle routing. Diverse studies hebben geavanceerde algoritmes ontwikkeld om order picking in magazijnen te optimaliseren. De studie van Ratliff & Rosenthal (1983) toonde aan dat de optimale order picking route voor magazijnen zonder dwarsgangen kan worden opgelost. Deze werd uitgebreid voor two-block magazijnen door Roodbergen & De Koster (2001) waarbij een exacte oplossing voor order picking route voor een magazijn met dwarsgangen werd ontwikkeld. Scholz et al. (2016) introduceerde vervolgens een wiskundig model dat optimalisaties biedt voor magazijnen met een willekeurig centrale dwarsgangen. Deze studie onderzocht de effecten van verschillende factoren zoals zone- en batchingbeleid, routeringsalgoritmen, grootte van de picklijst, vormverhoudingen, aantal en locaties van pick-&-deposit-punten, opslagstrategieën, en vraagverdelingen. Inzichten uit deze studies bieden magazijnmanagers waardevolle richtlijnen om hun order pickingactiviteiten te optimaliseren en layoutbeslissingen te verbeteren (Ozturkoğlu & Hoşer, 2019).

Het minimaliseren van orderdoorlooptijden draagt bij aan een snellere verwerking en verzending van bestellingen. Een doordachte inrichting van het magazijn, waarbij onder meer snel verkopende artikelen in de nabijheid van verzamel- of verzendpunten worden geplaatst, draagt bij aan een efficiënter gebruik van de beschikbare ruimte en leidt tot kortere loopafstanden tijdens het order pickproces. Het maximaliseren van de benutting van apparatuur en arbeid verhoogt de productiviteit en verlaagt operationele kosten. Ten slotte speelt ook de verbetering van ordertoegankelijkheid een rol. Een verhoogde efficiëntie binnen het order pickproces kan worden gerealiseerd door enerzijds een doelgerichte positionering van artikelen op basis van vraagfrequentie, en anderzijds door de inzet van geavanceerde warehousemanagementsystemen die order pickers in real-time aansturen via de meest efficiënte routes (De Koster et al., 2007).

2.8 Ontwerp van order pickingsystemen

Naast het minimaliseren van reistijd spelen ook andere ontwerpbeslissingen een cruciale rol in het efficiënt gebruiken van een OPS. Het ontwerp van een effectief OPS is een complex proces dat wordt beïnvloed door een breed scala aan externe en interne factoren. Externe factoren zoals beschreven door Goetschalckx & Ashayeri (1989) omvatten marketingkanalen die de distributie en afzetmarkt beïnvloeden; vraagpatronen, die de fluctuaties in klantorders bepalen; aanvulstrategie en voorraadbeheer, die de beschikbaarheid van producten beïnvloeden; en bredere economische omstandigheden, die de kosten en haalbaarheid van logistieke operaties sturen. Naast externe invloeden spelen ook interne factoren een cruciale rol bij het ontwerpen van order pickingsystemen. Het mechanisatieniveau bepaalt in hoeverre processen geautomatiseerd of handmatig worden uitgevoerd. Magazijndimensionering zoals de opslagcapaciteit en indeling beïnvloedt de efficiëntie van order picking. Bovendien is de beschikbaarheid van informatiesystemen essentieel voor het optimaliseren van order picking routes, voorraadbeheer en operationele aansturing (De Koster et al., 2007).

Om een keuze te maken welk type Order Picking Systeem (OPS) het beste past in zijn specifieke situatie waar een organisatie zich in bevindt kan je OPS opdelen in drie hoofdcomponenten. De eerste fase is de invoerfase. Om te beginnen aan de invoerfase moeten bedrijven de managementfactoren beginnen te analyseren. Bedrijven moeten kijken naar hoeveel budget er beschikbaar is, hoelang de projectduur is en welke strategische doelstellingen bedrijven willen behalen. De tweede stap is dat bedrijven hun operationele beperkingen gaan evalueren. Welke beschikbare magazijnruimte hebben bedrijven om hun project uit te voeren, rekening houdend met plafondhoogte. De laatste component is hoe gaan bedrijven hun gegevens verwerken. Deze gegevens zijn de klantorder en productstromen. Deze gegevens dienen om inzicht te krijgen in de operationele vereisten. De output van deze laatste fase is een specificatie van de algemene OPS-structuur en de onderliggende subsystemen (Dallari et al., 2009).

De volgende fase is de selectiefase waarin specifieke ontwerpkeuzes worden gemaakt. Bedrijven kijken naar verschillende types apparatuur om het OPS te ondersteunen zoals heftrucks en stellingen. Bedrijven bepalen een operationeel beleid waaronder opslag en order pickingstrategieën. Als laatste om een efficiënte goederenstroom te garanderen moeten bedrijven de fysieke transformatie en informatiestroom binnen het OPS definiëren. De grootste uitdaging binnen deze methode is het balanceren van ontwerpcomplexiteit. Een te groot aantal verschillende opties van OPS kunnen leiden tot lange ontwerptijden en hogere kosten, terwijl een te beperkt aantal ontwerpopties kan leiden tot suboptimale systemen (Dallari et al., 2009). De casestudy van Yoon & Sharp (1996) illustreert deze spanning. Zij onderzochten zeven OPS-alternatieven met analytische methoden, zonder gebruik te maken van simulaties. Waardoor er lange doorlooptijden ontstonden en bleef er een gebrek aan inzicht in de rationale achter de uiteindelijke systeemkeuzes. Dit benadrukt de noodzaak van een evenwichtige aanpak waarbij zowel analytische methoden als geavanceerde simulaties worden ingezet om tot een optimaal OPS-ontwerp te komen.

Ongeacht of de order pickers menselijke werknemers, autonome robots of er een samenwerking tussen de twee zijn, blijft reistijd een van de bepalende factoren voor operationele efficiëntie. De tijd die order picking in beslag neemt kan worden verminderd door strategische operationele maatregelen maar de magazijn lay-out is een fundamentele factor die deze reistijd kan beïnvloeden. In grote mate zal de reisroute en de efficiëntie ervan bepaald worden door de lay-out parameters. Deze parameters zijn het aantal gangpaden en de breedte en diepte van de opslagruimte. Nadat er een magazijn lay-out is geïmplementeerd is het nog moeilijk om deze aan te passen dus moeten magazijnmanagers zich richten op een zo efficiënt mogelijke implementatie (Ozturkoğlu & Hoşer, 2019). Door automatisering kunnen OPS ook efficiënter worden ingericht waardoor reistijden worden gereduceerd en operationele kosten verminderen.

2.9 Definitie en toepassingen van magazijnautomatisering

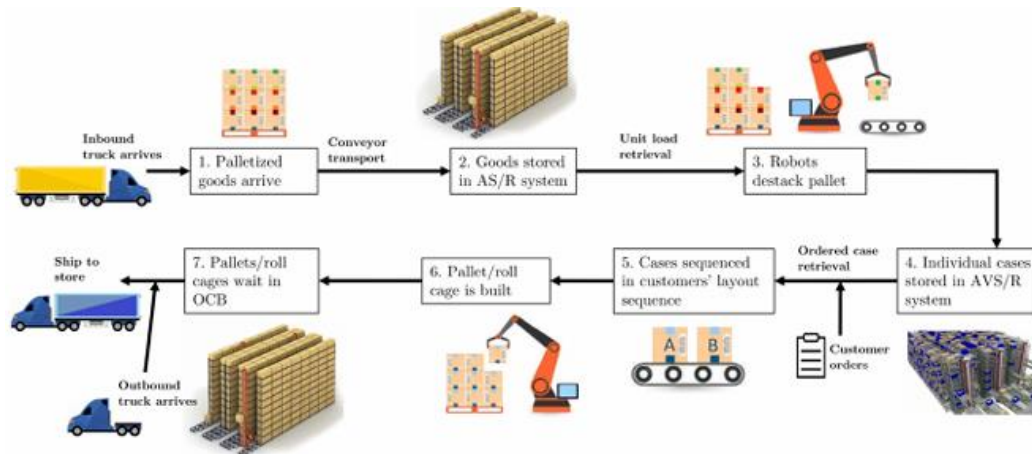
Magazijnautomatisering wordt gedefinieerd als: “De directe besturing van verwerkingsapparatuur die zorgt voor verplaatsing en opslag van ladingen zonder de noodzaak van operatoren of chauffeurs.” (Rowley et al., 2008). Deze definitie omvat technologieën die menselijke tussenkomst minimaliseren en magazijnprocessen volledig of grotendeels automatiseren. Een magazijnbeheersysteem (WMS) of een Radio Data Terminal (RDT) vallen beide buiten deze definitie. Bij deze magazijn technologieën zijn nog steeds menselijke operatoren nodig die een actieve rol in het proces spelen. Daarnaast omvatten deze twee geen directe automatisering van opslag en verplaatsing van artikelen (Baker & Halim, 2007).

Traditionele magazijnen en distributiecentra worden steeds meer getransformeerd tot intelligente opslagsystemen zonder vaste structuren te implementeren die de schaalbaarheid en het aanpassingsvermogen van toekomstige veranderingen beperken (Basile et al., 2012; López et al., 2016). Het is belangrijk om de processen zo aanpasbaar mogelijk te maken. De implementatie van flexibele automatiseringssystemen helpt magazijnen om zich aan te passen aan de veranderende marktvraag en technologische innovaties. Door automatiseringsstrategieën modulair en schaalbaar te maken, kunnen bedrijven deze risico's beheersen en duurzame groeimogelijkheden creëren.

Bedrijven moeten er rekening mee houden dat het implementeren van magazijnautomatisering meerdere stappen omvat. Dit weerspiegelt de inherente complexiteit van dergelijke projecten. De cross-functionele aard van deze projecten vereist betrokkenheid van meerdere afdelingen zoals logistiek, operations en informatietechnologie (IT). Ondanks deze uitdagingen blijkt uit onderzoek dat de meeste projecten redelijk succesvol zijn in het op tijd en binnen budget realiseren van automatisering (Baker & Halim, 2007). Hoewel de meeste bedrijven beschikken over planningsprocessen voor de automatisering van hun magazijn, richten deze zich vooral op de installatie van de nieuwe apparatuur en minder op het beheer van lopende operaties na de implementatie (Baker & Halim, 2007).

Hieronder staat een voorbeeld (figuur 2) van de goederenflow van een standaard geautomatiseerd magazijn. Wanneer de goederen van de vrachtwagen gelost zijn, worden ze op een check-in conveyor

gezet en daarna worden ze met behulp van een Autonomous Sorting and Retrieval System (AS/RS) in de stock opgenomen. De goederen op de pallet worden afgehaald naar individuele dozen om ze per doos in een AS/RS of een Autonomous Vehicle Storage and Retrieval System (AVS/RS) te plaatsen. Wanneer er een klantorder binnenkomt, worden de benodigde dozen uit stock genomen door het geautomatiseerde systeem. Hierna kunnen de goederen van het klantorder geconsolideerd worden op hetzelfde pallet. Als laatste kunnen de geconsolideerde klantorders verzonden worden per vrachtwagen. Dit is een volledig geautomatiseerde flow van goederen, bij dit systeem is er geen manuele handeling nodig om goederen van invoer naar uitvoer te laten gaan (Azadeh et al., 2019).



Figuur 2 Goederenflow in een geautomatiseerd magazijn (Azadeh et al., 2019)

Onderzoek door Maltz (2015) toont aan dat magazijnoperaties zich steeds meer richten op diensten met toegevoegde waarde zoals maatverpakkingen en productassemblage in het magazijn. Daarnaast wordt automatisering meer en meer ingezet bij cross-docking. Dit komt omdat de goederen in deze magazijnen direct van inkomende naar uitgaande vrachstromen worden verplaatst zonder langdurige opslag. Sommige andere onderzoekers zoals Baker (2004) tonen aan dat deze trends wel zichtbaar zijn in verschillende sectoren. Echter diensten met toegevoegde waarde spelen slechts een secundaire rol binnen een distributiecentrum. Bovendien is cross-docking voornamelijk inzetbaar in grotere magazijnen maar het wordt soms vermeden door de operationele complexiteit en de hoge coördinatievereisten (Baker & Halim, 2007). Door de inzet van magazijnautomatisering kunnen bedrijven een verbetering in productiviteit behalen door efficiëntere order picking door een hogere ordernauwkeurigheid wat fouten en retourzendingen vermindert. Daar bovenop kunnen bedrijven een verbeterde klantenservice leveren doordat orders sneller en met minder fouten worden geleverd. Daarnaast kunnen bedrijven ruimte besparen en daardoor een grotere volumecapaciteit behalen door hogere opslagdichtheid en compactere magazijninrichting. Er kunnen betere voorraadbeheerstrategieën worden ingezet door gebruik te maken van geavanceerde software en real-time tracking (Baker & Halim, 2007).

Volgens Gunasekaran (2001) verschuift de focus binnen supply chain management naar service en responsiviteit als de belangrijkste concurrentiefactoren. Dit heeft directe implicaties voor

magazijnontwerp en automatiseringsbeslissingen. Specifieke automatiseringsoplossingen kunnen worden ingezet voor specifieke sectoren. Voor sectoren zoals e-commerce en e-fulfilment zijn A-frame dispensers (figuur 3) geschikt door hun snelle orderverwerking van kleinere artikelen.



Figuur 3 Schets van een A-frame (Azadeh et al., 2019)

Pick-to-light systemen kunnen de nauwkeurigheid en snelheid van order picking verbeteren en transportband- en sorteersystemen zijn essentieel voor de efficiënte afhandeling van grote ordervolumes (Baker & Halim, 2007). Een hogere doorvoersnelheid kan worden gerealiseerd door de geavanceerde material-handlingsystemen zoals automatische opslag- en ophaalsystemen (AS/RS). Maar omdat er hoge investeringskosten en beperkte flexibiliteit is, hebben veel magazijnen in het verleden grootschalige automatisering vermeden (Ozturkoğlu & Hoşer, 2019).

2.10 Automatisering als strategische keuze

Uit de literatuur blijkt dat de meningen van onderzoekers over de voor- en nadelen van magazijnautomatisering sterk verdeeld zijn. Deze uiteenlopende inzichten duiden aan dat magazijnautomatisering geen universele oplossing is. Maar eerder afhankelijk is van de specifieke situatie. Volgens sommige onderzoekers kan magazijnautomatisering aanzienlijke voordelen bieden op het gebied van efficiëntie, ordernauwkeurigheid en ruimtebesparing. Volgens Sainathuni et al. (2014) kunnen operationele kosten binnen magazijnen worden verminderd door het toepassen van automatisering. Naast de financiële voordelen kunnen er ook ergonomische voordelen behaald worden voor de werknemers van het magazijn. Automatisering kan repetitieve en fysiek zware taken verlichten waardoor werknemers zich kunnen focussen op complexere waardevollere activiteiten. Dit leidt tot een efficiëntere taakverdeling en kan daarnaast het welzijn van medewerkers bevorderen (Kučera, 2017). Automatisering kan de productiviteit verhogen en daardoor processen stroomlijnen en de kans op fouten minimaliseren. Geautomatiseerde systemen kunnen zorgen voor een snellere orderverwerking en een betere voorraadnauwkeurigheid (Bansal et al., 2021). De primaire drijfveer achter automatisering binnen magazijnen is het streven naar een concurrentievoordeel. Bedrijven willen zich onderscheiden door middel van kostenefficiëntie, snelheid en nauwkeurigheid in hun order picking. Door te investeren in geavanceerde technologieën kunnen bedrijven hun marktpositie versterken (Varghese et al., 2021). Vaak wordt automatisering beschouwd als een manier om efficiënte, flexibele distributiecentra te realiseren. Een voorbeeld hiervan is het gebruik van geautomatiseerde sorteerapparatuur in distributiecentra zonder

voorraad die functioneren op basis van echte cross-docking. Dit principe kan worden uitgebreid met uitgestelde productie en diensten met toegevoegde waarde waarbij transport- en sorteerapparatuur in cross-docking faciliteiten wordt ingezet voor taken zoals labelen, bundling en verpakken. Deze activiteiten worden uitgevoerd zonder dat goederen worden opgeslagen (Harrison et al., 2019).

Andere onderzoekers stellen dat geautomatiseerde magazijnen twee belangrijke risico's met zich meebrengen. Het eerste risico is dat geautomatiseerde oplossingen vaak sterk geoptimaliseerd zijn voor specifieke workflows. Hierdoor kunnen ze minder goed inspelen op plotselinge verschuivingen in de vraag of assortimentswijzigingen. Bij magazijnen die een constante output hebben, kunnen automatiseringstechnologieën beter ingezet worden. Geautomatiseerde systemen zijn minder rendabel bij piekbelastingen (Winkelhaus et al., 2022). Er is noodzaak aan een gebalanceerde aanpak waarbij automatisering wordt gecombineerd met flexibele magazijnstrategieën om optimaal in te spelen op marktveranderingen (Baker & Halim, 2007). Het tweede risico is dat er te veel kan geïnvesteerd worden in vaste automatiseringssystemen wat leidt tot een vermindering in operationele flexibiliteit en een verhoogd financieel risico (Baker & Halim, 2007).

Hoewel reactievermogen een van de belangrijkste factoren is in volatiele markten blijven kosten een pijnpunt. In stabielere markten kunnen kostenbeheersing en efficiëntie de onderscheidende factoren zijn, wat hun belang benadrukt (Baker & Halim, 2007). Magazijnautomatisering wordt vaak gepresenteerd als kosteneffectief bij grootschalige operaties (Rowley et al., 2008). Dit wordt echter in twijfel getrokken door sommige studies. Hackman et al. (2001) tonen aan dat bedrijven met een hoog automatiseringsniveau over het algemeen minder efficiënt zijn. Er is een negatief verband tussen automatisering en efficiëntie maar dit effect wordt afgezwakt door schaalgrootte. In grotere distributiecentra is het negatieve effect minder uitgesproken. Er kan een onjuist systeemtype worden ingevoerd voor een magazijnoperatie. Ook na de implementatie van het systeem kunnen er nog fouten ontstaan. Bij een gebrek aan systeemonderhoud kunnen er operationele storingen ontstaan (Baker & Halim, 2007). Pfohl et al. (1992) stellen dat de efficiëntiewinst van automatisering vaak niet opweegt tegen de hogere bedrijfskosten en operationele complexiteit in grotere magazijnen. De werkelijke voordelen van automatisering lijken zich vooral voor te doen op het niveau van de bredere supply chain. Indien bedrijven de voorraden in grote distributiecentra kunnen centraliseren kunnen ze kosten beperken door verbeterde efficiëntie in deze grotere magazijnen. Eerdere studies tonen aan dat bedrijven automatisering zowel vanuit een kosten- als een serviceperspectief overwegen (Dadzie & Johnston, 1991). Daarnaast zijn de belangrijkste beslissingscriteria voor magazijnautomatisering een verlaging van de arbeidskosten, verhoging van operationele output en de verbetering van de beschikbaarheid en betrouwbaarheid van diensten van een organisatie. Ondanks de potentiële voordelen van magazijnautomatisering kunnen implementatieprocessen problematisch verlopen. Op korte termijn kunnen automatiseringsprojecten juist leiden tot een daling van de serviceniveaus door zogenaamde "burn-in" problemen (Hackman et al., 2001). Doordat nieuwe geautomatiseerde apparatuur uitvoerig getest en afgesteld moet worden, kunnen er initiële storingen optreden. Daardoor moeten er continue aanpassingen uitgevoerd worden die kunnen leiden tot operationele vertragingen. De exacte oorzaken

van mislukte automatiseringsprojecten zijn moeilijk te identificeren. Drury et al. (2003) wijzen erop dat dergelijke projecten bijzonder complex zijn en meerdere parallelle processen vereisen. Door een juiste ontwikkeling en integratie van bepaalde apparatuur en deze voldoende uit te werken kan er een juiste uitwerking van automatiseringsprojecten plaatsvinden en reduceert het risico op mislukking (Baker & Halim, 2007).

Recente ontwikkelingen in zowel productie- als distributielogistiek hebben ertoe geleid dat het ontwerpen en beheren van order pickingprocessen steeds belangrijker en complexer is geworden. In de productiesector is er een trend naar kleinere bestelhoeveelheden, levering op de plaats van gebruik, order- en productaanpassingen en kortere cyclustijden (De Koster et al., 2007). Bij distributielogistiek worden klantorders steeds later geaccepteerd en moeten leveringen plaatsvinden binnen steeds kortere en striktere tijdsvensters waardoor de beschikbare tijd voor order picking beperkt wordt. Een andere factor is dat de schaalvergroting bij magazijnen ertoe geleid heeft dat kleinere magazijnen vervangen worden door grote distributiecentra met een hoog dagelijks ordervolume en een beperkt tijdsvenster voor order picking (Van Hoek, 2001). Daarnaast worden meer en meer Value Added Logistics (VAL) en Value Added Services (VAS) uitgevoerd binnen de distributiecentra zelf. Deze moeten dan ook nog geïntegreerd worden in het order pickingproces (De Koster et al., 2017). Retour logistiek is ook belangrijker geworden doorheen de tijd. Magazijnen spelen nu ook een rol in het terughalen van producten van klanten om deze daarna opnieuw te verzenden, recyclen, retourneren aan de fabrikant of zelfs de producten weggooien (De Koster et al., 2002).

Magazijnautomatisering heeft langdurige gevolgen voor de operationele efficiëntie en flexibiliteit van een organisatie en moet worden bekeken als een strategische beslissing binnen het magazijnontwerpproces (Rouwenhorst et al., 2000). Succesvolle automatiseringsprojecten zijn afhankelijk van goed gedefinieerde interfaces tussen de verschillende gebruikte systemen samen met realistische tijdschema's die rekening houden met de complexiteit van de implementatie. De beslissing om al dan niet te automatiseren moet worden genomen op basis van bedrijfsvereisten en een gedetailleerde data-analyse (Rowley et al., 2008). De effectiviteit van magazijnautomatisering wordt in de literatuur niet eenduidig bevestigd. Er zijn tegenstrijdige inzichten over de mate waarin automatisering de reactietijd en flexibiliteit verbetert en het kostenvoordeel van automatisering op lange termijn. Hoewel automatisering vaak wordt gepresenteerd als een manier om operationele efficiëntie te verhogen, wordt ook erkend dat het een negatieve invloed kan hebben op de wendbaarheid van magazijnen (Baker & Halim, 2007).

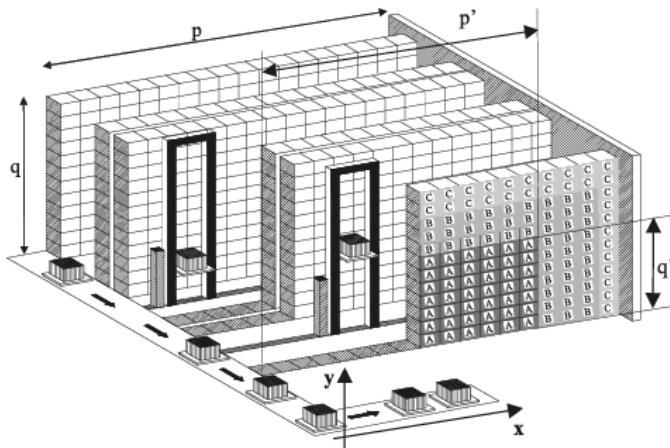
Hoewel verbeterde service en kostenverlaging belangrijke motieven zijn voor bedrijven om magazijnautomatisering te implementeren, blijkt uit onderzoek dat het faciliteren van groei de voornaamste reden is. Bedrijven kiezen voor automatisering om in te spelen op schaalvergroting. Automatisering speelt een cruciale rol in het efficiënt beheren van grotere magazijnoperaties omdat het zorgt voor snelle en nauwkeurige orderverwerking en een hogere doorvoer (Baker & Halim, 2007).

2.11 De verschillende types automatisering

In de voorgaande sectie werd de impact van magazijnautomatisering geanalyseerd waarbij zowel de voordelen als de risico's van geautomatiseerde systemen werden belicht. Een belangrijke bevinding was dat automatisering kan bijdragen aan efficiëntie, nauwkeurigheid en kostenbeheersing maar dat er ook uitdagingen zijn op het gebied van flexibiliteit en initiële implementatieproblemen. Deze bevindingen vormen het kader voor de verdere bespreking van specifieke automatiseringstechnologieën die elk op een andere manier inspelen op de operationele en strategische afwegingen binnen magazijnen. Als eerste worden Automated Storage and Retrieval Systems (AS/RS) behandeld. Vervolgens worden automatisch geleide voertuigen (AGV) en autonome mobiele robots (AMR) besproken. Daarnaast wordt het cube storage-systeem besproken, een innovatieve technologie die verschillende automatiseringsprincipes combineert. Door de technische werking en toepassing van deze systemen te onderzoeken wordt in de volgende secties concreet inzicht gegeven in hoe magazijnautomatisering zich vertaalt naar praktische implementaties en welke systemen het best aansluiten bij specifieke operationele vereisten.

2.11.1 AS/RS-systemen

Automated Storage and Retrieval Systems (AS/RS) zijn geavanceerde opslagsystemen die gebruikmaken van geautomatiseerde opslag- en ophaalapparaten die zich langs vaste rails tussen magazijnrekken bewegen (Hur & Nam, 2006). Er bestaan diverse methoden voor het opslaan en ophalen van goederen met AS/RS-technologie waarbij snelheid en nauwkeurigheid centraal staan. De opslagrekken vormen de basisstructuur van het systeem en bestaan uit metalen rekken die ruimte bieden voor pallets, bakken of andere opslageenheden. Deze rekken zijn ontworpen om goederen op een compacte en georganiseerde manier op te slaan waardoor de opslagdichtheid binnen het magazijn wordt gemaximaliseerd (Shivanand, 2006). Een cruciaal onderdeel van het systeem zijn de kranen die zijn uitgerust met automatische opslag- en ophaalmechanismen. Deze kranen verplaatsen zich verticaal en horizontaal binnen de gangpaden, tillen goederen op en plaatsen ze nauwkeurig op de toegewezen opslaglocaties of transporteren ze naar de uitgiftepunten (Roodbergen & Vis, 2009). De gangpaden zijn de smalle doorgangen tussen de opslagrekken waarin de kranen opereren. Door de geoptimaliseerde breedte van deze gangpaden wordt de beschikbare ruimte in het magazijn efficiënt benut, terwijl de bewegingsvrijheid van de kranen behouden blijft (Ellithy et al., 2024). Daarnaast beschikt het systeem over input/output-poorten, oftewel in- en uitgiftepunten waar inkomende goederen worden geplaatst en opgehaalde ladingen worden afgezet. Deze poorten vormen de interface tussen de geautomatiseerde opslag en de verdere logistieke processen binnen het magazijn. Als het systeem is uitgerust met pickstations kunnen operatoren individuele artikelen uit de opgeslagen eenheden selecteren voordat ze terugkeren naar het systeem. Dit verhoogt de flexibiliteit van AS/RS en maakt het geschikt voor omgevingen waarin zowel bulkopslag als order picking op artikelniveau nodig is (Azadeh et al., 2019).



Figuur 4 AS/RS systeem (Manzini et al., 2006)



Figuur 5 AS/RS met kraan (Azadeh et al., 2019)

AS/RS-systemen gebruiken geautomatiseerde apparatuur om opslag- en ophaaloperaties snel en efficiënt uit te voeren (Manzini et al., 2006). Deze systemen staan bekend om hun hoge precisie en effectiviteit bij het sorteren, organiseren, bufferen en opslaan van diverse items (Yu et al., 2017). Door optimaal gebruik te maken van verticale opslagruimte, minimaliseren AS/RS-systemen de behoefte aan arbeidskrachten en voorkomen ze de noodzaak van extra magazijnuitbreiding (Sullivan & Kern, 2021). Dit draagt bij aan een duurzame productiviteitsverbetering op de lange termijn (Ellithy et al., 2024).

AS/RS-systemen zijn een belangrijke stap in de evolutie van magazijnautomatisering en spelen een cruciale rol bij het optimaliseren van opslagruimte en orderverwerking. Door hoogbouwopslag en geautomatiseerde kraansystemen te combineren met slimme software-integratie, kunnen bedrijven de opslagcapaciteit maximaliseren. Daarnaast kan de operationele efficiëntie verhoogd worden en arbeidskosten en foutenmarges verminderen. Door de voortdurende ontwikkelingen in robotica en kunstmatige intelligentie zal de toepassing van AS/RS in de toekomst alleen maar toenemen wat magazijnen nog intelligenter en flexibeler zal maken (Ellithy et al., 2024).

2.11.2 Shuttle-AS/RS

Shuttle-gebaseerde AS/RS (figuur 6) maakt gebruik van shuttles of robots om voorraad binnen een opslagsysteem te verplaatsen. Deze voertuigen bewegen zich langs rails en transporteren containers of dozen tussen opslagstructuren en werkstations (Ellithy et al., 2024). Een Shuttle-AS/RS is een geavanceerd geautomatiseerd opslagsysteem dat gebruikmaakt van zelfrijdende shuttles om goederen op te halen en te verplaatsen binnen een magazijn. De shuttle gaat naar de opslaglocatie van het gevraagde artikel. De shuttle haalt de container, bak of doos met het product op uit het opslagrek en bevestigt de opname via een sensorsysteem. Als laatste brengt de shuttle de artikelen naar een workstation waar verdere verwerking van het klantorder kan plaatsvinden. Alternatief kan de shuttle de lading op een transportband plaatsen voor verdere verplaatsing naar een sorteer- of verpakkingszone (Y. Ha & Chae, 2018).

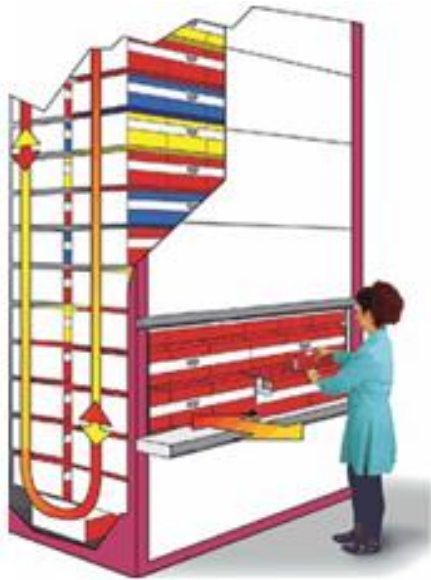


Figuur 6 Shuttle-AS/RS (Da Costa Barros & Nascimento, 2021)

Shuttle-gebaseerde systemen kunnen opereren op één of meerdere niveaus, afhankelijk van de magazijnindeling en de gewenste doorvoercapaciteit. Dankzij deze flexibiliteit kunnen shuttle-AS/RS-systemen eenvoudig worden geschaald en aangepast aan verschillende orderverwerkingsbehoeften. Ze zijn bijzonder geschikt voor magazijnen met hoge doorvoersnelheden, dynamische orderprofielen en compacte opslagvereisten, zoals e-commerce distributiecentra en productielogistiek (Y. Ha & Chae, 2018; Ellithy et al., 2024).

2.11.3 Carrousel-gebaseerde AS/RS

Carrousel-gebaseerde AS/RS-systemen maken gebruik van een draaiend systeem waarin containers met producten worden opgeslagen en verplaatst totdat het gevraagde item beschikbaar is. Er zijn twee verschillende carrouzels. Er zijn verticale carrouzels (figuur 7) waarbij bakken verticaal bewegen, zoals op een reuzenrad wat efficiënt gebruikmaakt van hoogte en de opslagdichtheid verbetert. Daarnaast zijn er horizontale carrouzels (figuur 8) waarbij bakken horizontaal bewegen op een draaimolen. Deze zijn ideaal voor kleine onderdelen, documenten en materialen. Bij beide varianten selecteert het systeem automatisch de juiste carrousel, het juiste schap en het gewenste artikel. Dit minimaliseert zoektijd en verhoogt de nauwkeurigheid van het order picking proces (Ellithy et al., 2024).



Figuur 7 Verticale carroussel (Pinto et al., 2023)



Figuur 8 Horizontale carroussel (Azadeh et al., 2019)

2.11.4 Verticale liftmodules (VLM)

Een Verticale Liftmodule (VLM) (figuur 9) is een gesloten opslagsysteem met verschillende leggers. Een VLM is een geautomatiseerd opslagsysteem dat gebruikmaakt van een liftmechanisme om de leggers of containers op te slaan en op te halen. Dit systeem werkt volgens een parts-to-picker principe, waardoor medewerkers niet hoeven te zoeken naar artikelen maar deze direct op de juiste hoogte worden aangeboden (Azadeh et al., 2019).



Figuur 9 Verticale lift module (Pinto et al., 2023)

Het proces verloopt in vier stappen. In de eerste stap vraagt een operator een artikel aan via een Warehouse Management System (WMS) of een bedieningsinterface. Daarna zoekt het systeem naar de juiste legger of container binnen de VLM en haalt deze op. Daarna wordt de legger automatisch naar de picker gebracht waar de operator de benodigde artikelen verzamelt of verwerkt. Als laatste stap nadat

de order picking voltooid is wordt de container teruggeplaatst op de juiste opslaglocatie binnen de VLM (Ellithy et al., 2024). De picker staat op een vaste plaats waardoor de picktijd vermindert door het elimineren van de wandeltijd van de picker. Daarnaast kan de picker nog andere taken uitvoeren tijdens het wachten op het systeem (Azadeh et al., 2019). Er kan een verhoging van de order pickingefficiëntie en een vermindering in de fysieke belasting van de picker plaatsvinden doordat de picker een vaste plaats heeft. Daarnaast maakt de VLM optimaal gebruik van verticale opslagruimte wat resulteert in een hoge opslagdichtheid zonder extra vloeroppervlakte in beslag te nemen. Dynamische leggers kunnen ook ingezet worden in dit systeem zodat leggers automatisch ingedeeld worden op basis van hun vraagfrequentie waardoor veelgevraagde artikelen sneller beschikbaar zijn en orderverwerkingstijden verder worden verkort. Door deze voordelen zijn VLM-systemen bijzonder geschikt voor e-commerce distributie, productieomgevingen en farmaceutische opslag waar snelle orderverwerking, precisie en ruimte-efficiëntie cruciaal zijn (Manzini et al., 2006; Ellithy et al., 2024). In een VLM-systeem worden de goederen automatisch naar de picker gebracht maar het aanvullen van de stock zal nog steeds handmatig moeten gebeuren wat bij sommige systemen het picking proces kan onderbreken (Azadeh et al., 2019).

2.11.5 AGV's en AMR's

De eerste versies van de AGV's gebruikte draadgeleidingstechnologie waarbij kabels onder de vloer zitten of magnetische tape op het vloeroppervlak om hun weg te detecteren doorheen het magazijn. Het grootste aandeel van de huidige AGV's gebruiken wel nog reflecterende of gekleurde tape (Fedorko et al., 2017). Bij een ander type navigatiesysteem worden magneten op bepaalde intervallen geplaatst zodat de AGV zich kan voortbewegen doorheen het magazijn. Als laatste zijn er lasergeleide AGV's die de positie van het voertuig detecteren door de afstanden van reflecterende punten te berekenen (Reinke & Beinschob, 2013). Een volgende stap in de ontwikkeling van AGV's is de integratie van draadloze communicatiesystemen. Wanneer alle AGV's uitgerust zijn met Wi-Fi, ontstaat de mogelijkheid voor onderlinge communicatie, niet alleen met het Warehouse Management System (WMS), maar ook met andere voertuigen en werkstations. Deze vorm van connectiviteit bevordert een meer gecoördineerde en efficiënte werking binnen het magazijn (Herrero-Perez & Matinez-Barbera, 2008; Ellithy et al., 2024).

De systemen (figuur 10) sorteren producten automatisch naar de juiste verzamelpunten (Oyekanlu et al., 2020). Deze systemen navigeren autonoom door het magazijn en transporteren volledige containers met producten naar sorteerstations, waar een menselijke operator of een ander geautomatiseerd systeem de benodigde items verwerkt (Ellithy et al., 2024). AGV's kunnen voor meer diverse taken worden gebruikt, niet enkel meer voor transport van goederen (Fernández-Caramés et al., 2019).



Figuur 10 AGV die goederen transporteert (Da Costa Barros & Nascimento, 2021)

Figuur 11 illustreert de verschillende type AGV's van het merk SSI Schaefer (*AGV in uw magazijn SSI SCHÄFER, z.d.*). Er worden vorkheftruck-AGV's afgebeeld. Deze zijn ontworpen voor het heffen en verplaatsen van pallets binnen magazijnen met hoge opslagrekken. In het midden aan de onderkant zijn platform-AGV te zien, deze zijn bedoeld voor intern transport van bakken en kleine goederen. De keuze voor een specifiek type AGV wordt beïnvloed door diverse factoren waaronder de aard van het magazijn, het type, het gewicht en de afmetingen van de goederen.



Figuur 11 Verschillende soorten AGV's (AGV in uw magazijn | SSI SCHÄFER, z.d.)

Een voordeel van AGV's zijn hun potentieel om de operationele kosten te reduceren. Door repetitieve en manuele taken te automatiseren dragen AGV's bij aan een vermindering van de arbeidskosten. Daarnaast kunnen AGV's met een verhoogde precisie werken. In tegenstelling tot traditionele magazijnen waarin order pickers gebruikmaken van transpalletten of heftrucks, vereisen AGV's minder ruimte tussen de gangpaden. Deze systemen zijn geoptimaliseerd voor efficiënt ruimtegebruik. Bovendien zijn AGV-

systemen schaalbaar, wat betekent dat meer AGV's kunnen toegevoegd worden naarmate de operationele vraag toeneemt (Custodio & Machado, 2020).

Er zijn ook enkele nadelen verbonden aan de implementatie van AGV's in magazijnen. Een eerste beperking is de hoge investeringskost. Deze omvat niet enkel de aankoop van de voertuigen zelf maar ook de installatie van de infrastructuur zoals navigatiesensoren, laadstations en beheerssoftware (Dhaliwal, 2020).

Een Autonome Mobiele Robot (AMR) vertoont gelijkenissen met een Autonoom Geleid Voertuig (AGV) maar er zijn een aantal belangrijke verschillen. Hoewel beide technologieën worden gebruikt voor intern transport, zijn er enkele fundamentele verschillen tussen hen. Als het pad geblokkeerd wordt door een object zal de AGV stoppen en inactief blijven totdat het object verwijderd wordt. Dit komt doordat de AGV een vooraf gedefinieerde route heeft en enkel deze route volgt. Een AMR kan zonder menselijke tussenkomst nieuwe routes nemen en het object ontwijken (Da Costa Barros & Nascimento, 2021). Door de integratie van deze technologie is het mogelijk om verplaatsbare rekken te laten optillen door de AMR en deze bij order pickers af te leveren wat leidt tot een verkorting van de picktijd dankzij het gebruik van het parts-to-picker-principe (Azadeh et al., 2019). Op Figuur 12 zijn voorbeelden te zien waar er verschillende reksoorten worden vervoerd door een AMR van het merk Kiva Robots.



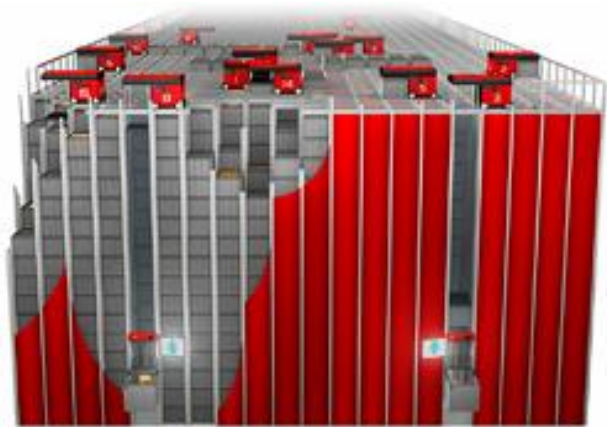
Figuur 12 Verschillende type AMR (Ames, 2021)

Autonome mobiele robots bieden vergelijkbare voordelen als autonome geleide voertuigen waaronder verhoogde precisie in uitvoering en schaalbaarheid. Maar net zoals bij AGV's gaan AMR's gepaard met aanzienlijke investeringskosten. Bij een AMR-systeem is er wel een bijkomende uitdaging wat de integratie betreft. De batterijen van de AMR's moeten regelmatig worden opgeladen wat invloed heeft op de operationele continuïteit indien het laadproces niet goed georganiseerd wordt (Keith & La, 2024).

2.11.6 Cube storage



Figuur 13 Cube storage (autostore) (W. Y. Ha, 2024)



Figuur 14 Cube storage (Azadeh et al., 2019)

Bij dit type van magazijnopslag worden AGV's gebruikt als ondersteuning voor het ophalen van de goederen. De opslagbakken worden gestockeerd in een formatie in de vorm van een raster (figuur 13 en 14). De AGV's kunnen de gehele bakken optillen en transporteren naar een pickstation voor verdere verwerking. Doordat de AGV's boven de opslagbakken bewegen kunnen er meerdere bakken worden getransporteerd (Azadeh et al., 2019; W. Y. Ha & Jiang, 2023). Het grootste voordeel van deze manier om goederen te stockeren is de opslagcapaciteit, er kan optimaal gebruik gemaakt worden van de beschikbare magazijnruimte (W. Y. Ha et al., 2021). Bedrijven kunnen genieten van kostenbesparingen omdat ze binnen een bepaalde ruimte de opslag kunnen verhogen (W. Y. Ha, 2024). De picktijd wordt aanzienlijk verminderd omdat er een compacte opstelling wordt gebruikt, hierdoor stijgt de orderdoorlooptijd. Bedrijven kunnen dus een verhoging van de productiviteit en een verlaging van de kosten bereiken door het inzetten van dit type magazijnopslag. Omdat handmatig order picken gevoelig is voor fouten kunnen geautomatiseerde systemen de kans op fouten doen dalen. De nauwkeurigheid waarmee de systemen kunnen werken zal de juistheid van de voorraad garanderen. Een ander voordeel van dit systeem is de schaalbaarheid. Dit is een opslagmethode die mee kan veranderen aan de behoeften van de bedrijven. Bedrijven kunnen de beschikbare hoogte optimaal benutten door verticale uitbreidingen toe te passen. Bovendien heeft het systeem een modulair ontwerp waardoor uitbreidingen en aanpassingen eenvoudig kunnen worden doorgevoerd op basis van specifieke productvereisten. Bedrijven kunnen hun opslagcapaciteit stapsgewijs uitbreiden naarmate dat ze groeien (W. Y. Ha, 2024).

2.12 Mens-robot samenwerking binnen order picking systemen

Volgens Pasparakis et al. 2021 kunnen mens-robot samenwerkingen in OPS in twee categorieën worden ingedeeld waarbij de mens een actieve of passieve rol heeft in samenwerking tussen mens en robot. De keuze tussen een actieve of passieve menselijke rol hangt af van de doelen van het magazijn. Er gaat een voorkeur voor een actieve menselijke rol als er hoge snelheid en productiviteit vereist is. Als nauwkeurigheid en foutreductie de hoofddoelen zijn wordt de voorkeur aan een passieve menselijke rol gegeven. Menselijke medewerkers worden nog steeds ingezet om pieken op te vangen. Bovendien blijven

menselijke medewerkers essentieel om piekbelastingen op te vangen en continuïteit te garanderen in geval van storingen of onverwachte uitval van geautomatiseerde systemen (Winkelhaus et al., 2022).

Hoewel de meerderheid van de order picking in West-Europa nog steeds handmatig wordt uitgevoerd (De Koster et al., 2007), zorgen recente technologische ontwikkelingen voor een transformatie in de manier waarop OPS worden georganiseerd (Zhang et al., 2023). Het onderzoek van Azadeh et al. (2019) richtte zich op de technologische componenten van robot-geautomatiseerde order picking systemen. Hierbij werden voornamelijk transport- en opslagtechnologieën geanalyseerd die de efficiëntie en nauwkeurigheid van magazijnoperaties verhogen. De twee belangrijkste technologieën die in het onderzoek centraal staan, zijn automatische opslag- en ophaalsystemen (AS/RS) en AGV's. Hoewel deze technologieën bijdragen aan snellere en nauwkeurigere orderverwerking, ligt de nadruk voornamelijk op transport en opslag. Dit betekent dat de directe mens-robot samenwerking in order picking minder wordt onderzocht binnen deze technologische benadering. In de praktijk betekent dit dat robots en geautomatiseerde systemen vooral worden ingezet als ondersteunende middelen, terwijl menselijke order pickers nog steeds een actieve rol spelen in taken zoals order picking, kwaliteitscontrole en complexe orderverwerking (Zhang et al., 2023).

Traditioneel werd automatisering geassocieerd met inflexibele, vaste systemen en robots met beperkte functionaliteit. Maar recente ontwikkelingen in de automatiseringstechnologie hebben geleid tot autonome en collaboratieve robots (figuur 15) (Özturkoğlu & Hoşer, 2019). Het ondersteunen van menselijke medewerkers door autonome robots in te zetten wordt steeds belangrijker om de productiviteit van de medewerkers te verhogen (Winkelhaus et al., 2022).

De robots kunnen gebruikt worden als automatisch transportmiddel van de klantorders waarbij de picker de artikelen op de robot plaatst en deze het klantorder wegbrengt indien hij vol is (Winkelhaus et al., 2022). Oftewel kunnen de autonome robots goederen of rekken naar de pickers brengen. Bij deze manier kunnen bedrijven hun picktijd verlagen en de productiviteit verhogen. Pickers kunnen zich enkel bezighouden met het daadwerkelijk picken van de goederen. Hierdoor kan de reisafstand van de picker verlagen omdat de picker op een vaste plaats werkt (Knudsen & KaiVo-Oja, 2020). Pickingrobots (figuur 15) bieden een innovatieve oplossing voor efficiëntieverbetering en kostenbesparing binnen magazijnoperaties. Een van de grootste voordelen is de mogelijkheid tot integratie in bestaande handmatige order picking systemen (OPS) zonder dat de magazijnlay-out hoeft te worden aangepast. Dit maakt de implementatie eenvoudig en schaalbaar. Daarnaast bevorderen deze robots mens-robot samenwerking waarbij ze menselijke order pickers ondersteunen of zelfs volledig vervangen in repetitieve en fysiek belastende taken. Dit leidt niet alleen tot hoger werkcomfort maar ook tot snellere en nauwkeurigere orderverwerking. In vergelijking met conventionele geautomatiseerde systemen bieden pickingrobots hoge flexibiliteit omdat ze dynamisch kunnen worden ingezet en eenvoudig kunnen worden aangepast aan veranderende magazijnomstandigheden (Zhang et al., 2023).



Figuur 15 Pickingrobots (Zhang et al., 2023)

Ondanks de voordelen brengt de inzet van pickingrobots (figuur 15) ook uitdagingen met zich mee. Een van de grootste obstakels zijn de hoge initiële investeringskosten die bedrijven kunnen afschrikken, vooral als de terugverdientijd onzeker is. Daarnaast vereisen deze systemen regelmatig onderhoud en software-updates om optimale prestaties en integratie binnen het magazijn te garanderen. Dit kan leiden tot extra operationele kosten en technische afhankelijkheid. Ten slotte blijven ergonomische risico's bestaan, met name bij repetitieve taken zoals handmatige interactie met de robots of orderverwerking op stations die niet volledig geautomatiseerd zijn. Dit benadrukt de noodzaak van een zorgvuldige implementatie, waarbij zowel de voordelen als de beperkingen van pickingrobots worden afgewogen (Zhang et al., 2023).

Een andere samenwerking is het Hybrid Order Picking System (HOPS), een gecombineerd order pickingsysteem dat zowel traditionele handmatige order pickingsystemen (OPS) als geautomatiseerde en gerobotiseerde systemen integreert. Bij dit model gaan bedrijven menselijke order pickers en robots samen laten werken waardoor magazijnoperaties efficiënter en flexibeler worden. HOPS kan de werklast van menselijke order pickers aanzienlijk verminderen door repetitieve en fysiek belastende taken over te dragen aan robots. Een ander voordeel van HOPS is de hoge flexibiliteit omdat het systeem kan worden aangepast aan verschillende vraagpatronen. Dit maakt het een aantrekkelijke oplossing voor sectoren zoals e-commerce, retail en groothandelslogistiek, waar zowel handmatige als geautomatiseerde orderverwerking nodig is. Winkelhaus et al. (2022) onderzochten HOPS primair vanuit een economisch perspectief en concludeerden dat een hybride aanpak kan leiden tot kostenbesparingen en productiviteitsverhoging bij een juiste implementatie. Zhang et al. (2021) suggereerde dat mens-robot samenwerking in een HOPS onder bepaalde systeeminstellingen de fysieke belasting van werknemers kan verminderen. Dit is relevant in magazijnen waar robots de zwaarste taken overnemen en menselijke medewerkers zich kunnen richten op fijnere orderverwerking. Winkelhaus et al. (2021) benadrukten echter dat de rol van menselijke order pickers in een HOPS verandert. Er kunnen nieuwe ergonomische risico's ontstaan zoals een hogere mentale werkbelasting en langdurige interactie met geautomatiseerde systemen. Door deze onderzoeken wordt duidelijk dat HOPS-systemen potentieel grote voordelen bieden maar dat een zorgvuldige balans tussen automatisering en menselijke inzet essentieel is voor een succesvolle implementatie (Zhang et al., 2023).

3 Empirisch onderzoek

In het voorgaande deel, de literatuurstudie zijn factoren besproken die van invloed zijn op de beslissingen om te automatiseren. In dit deel, het empirisch onderzoek, zullen magazijnmanagers worden geïnterviewd om inzicht te krijgen in hun beslissingen. De gekozen methode is kwalitatief onderzoek door middel van diepte-interviews met magazijnmanagers en andere belanghebbenden in de logistieke sector. Dit heeft als doel praktijkervaringen te verzamelen over uitdagingen en mogelijke oplossingen binnen magazijnautomatisering. Door de input van experts kunnen aspecten belicht worden die niet altijd in de literatuur voorkomen. Hierdoor kunnen we de verschillen tussen theorie en praktijk blootleggen wat kan leiden tot nieuwe inzichten en kennis. De analyse van de resultaten zal plaatsvinden na de introductie van de respondenten.

3.1 Voorstelling respondenten

Voorafgaand aan de bespreking van de interviewresultaten, zullen de respondenten worden geïntroduceerd. Er zijn 4 respondenten afkomstig uit verschillende bedrijven en verschillende sectoren. Door deze verscheidenheid aan posities kunnen verschillende perspectieven worden belicht wat een vollediger beeld geeft van de voordelen en uitdagingen binnen het automatiseren van de magazijnen.

Mijn eerste respondent is een Operations Manager bij e-power. In zijn functie is hij verantwoordelijk voor de coördinatie en aansturing van vier operationele afdelingen binnen het bedrijf. De eerste afdeling is productie waar de nadruk ligt op het tijdig afleveren van generatoren met een gegarandeerde kwaliteit. De tweede afdeling is testing waar alle geproduceerde generatoren worden gecontroleerd op technische juistheid en een correcte afwerking. Deze controle is essentieel om de hoge kwaliteitsstandaarden van het bedrijf te garanderen. Daarnaast beheert hij ook de magazijnwerking. Deze afdeling staat in voor het stockbeheer, de interne logistieke flow, het tijdig aanleveren van goederen aan de productie en de verzending van spare parts naar klanten. Ten slotte is hij ook verantwoordelijk voor de afdeling werkvoorbereiding, die instaat voor het tijdig aanleveren van correcte werkinstructies en technische tekeningen aan de productieafdeling. Deze voorbereiding is cruciaal om een kwalitatief eindproduct te kunnen realiseren. Door zijn centrale rol in het aansturen van deze vier afdelingen draagt de operations manager bij aan de dagelijkse efficiëntie en kwaliteitsborging binnen de organisatie.

e-power is actief in de productie en distributie van stroomaggregaten, met een specialisatie in noodstroomoplossingen voor diverse industriële toepassingen. De onderneming bedient voornamelijk de B2B-markt, waarbij gekozen werd voor een indirect distributiemodel via gespecialiseerde dealers, eerder dan rechtstreekse verkoop aan eindgebruikers. Binnen de logistieke operaties van e-power vormt het magazijn een cruciale schakel. De kernactiviteiten omvatten het order picken van uiteenlopende componenten, gaande van eenvoudige bevestigingsmaterialen zoals bouten en moeren tot hoogwaardige motoren en complexe assemblages met aanzienlijke economische waarde. Bij e-power wordt het order pickproces georganiseerd via een combinatie van manuele en geautomatiseerde systemen. In het manuele segment verzamelen order pickers kleinere onderdelen met behulp van karren, waarbij zij zich

door een beperkt aantal gangen in het magazijn verplaatsen. Voor grotere en zwaardere componenten wordt gebruikgemaakt van heftrucks, wat een efficiëntere hantering van volumineuze goederen mogelijk maakt. Daarnaast is er een geautomatiseerd systeem aanwezig in de vorm van een Verticale Lift Module (VLM). Deze VLM maakt het mogelijk om meerdere orders simultaan te verzamelen, wat bijdraagt aan een verhoogde verwerkingssnelheid en een efficiëntere benutting van de verticale magazijnruimte. Naast picking omvatten de dagelijkse magazijnactiviteiten het uitvoeren van verzendingen van spare parts, het uitvoeren van periodieke stocktellingen en de voorbereiding van onderdelen voor de productieafdelingen.

Het bedrijf beschikt over vier aparte magazijngebouwen waarin een totale voorraad wordt beheerd met een geschatte waarde van circa twintig miljoen euro. Het personeelsbestand binnen de magazijnafdeling telt ongeveer twintig medewerkers. Qua producten wordt gewerkt met een breed assortiment van SKU's waarbij de complexiteit en heterogeniteit van de goederen bepalend zijn voor de magazijnoperaties. Het gaat van uiterst kleine tot zeer volumineuze en fragiele onderdelen. Voor producten, zoals batterijen en accu's wordt er een nadruk gelegd op een strikt First In First Out (FIFO) beleid gehanteerd om veroudering te vermijden en om garantievoorzaken te kunnen blijven respecteren. Dergelijke vereisten leggen bijkomende eisen op inzake stockbeheer en order picking.

Om de efficiëntie van het order picken te verhogen en de operationele betrouwbaarheid te verbeteren heeft e-power ingezet op gedeeltelijke automatisering. Een belangrijke investering hierin is de implementatie van een Verticale Lift Module (VLM), specifiek bedoeld voor het verwerken van kleine onderdelen. De VLM brengt de goederen automatisch naar de operator waardoor de noodzaak om manueel door de rekken te navigeren sterk gereduceerd wordt. Dit resulteert niet alleen in een significante tijds winst maar ook in een lagere fysieke belasting voor de werknemers en een vermindering van het aantal pickfouten. Parallel hiermee wordt gebruikt gemaakt van een ERP-systeem (Odoo) gekoppeld aan een scannersysteem voor de registratie van inbound- en outboundbewegingen. Hoewel dit een aanzienlijke verbetering betekende ten opzichte van de vroegere papieren processen blijkt het systeem kwetsbaar voor menselijke fouten. Dit komt doordat er een gebrek aan ingebouwde validatiemechanismen is, zoals automatische foutdetectie bij dubbele scanning of verkeerde hoeveelheden.

De belangrijkste motivatie voor e-power om te automatiseren was kostenbesparing, specifiek door de verhoging van de pickefficiëntie en de reductie van personeel intensieve processen. De investering in de VLM kon binnen een periode van ongeveer drie jaar worden terugverdiend wat een directe economische rechtvaardiging bood voor de implementatie. Toch worden de mogelijkheden voor verdere automatisering beperkt door de hoge productdiversiteit en de lage standaardisatiegraad binnen de magazijnprocessen. De combinatie van uiteenlopende productformaten, variërende pickfrequenties en wisselende prioriteiten maakt het moeilijk om volledig geautomatiseerde systemen rendabel in te zetten. E-power overweegt verdere automatisering enkel in nieuwe projecten zoals de P-Grid productielijn waar slechts drie vaste types generatoren worden geproduceerd. Daarnaast speelt ook de groeidynamiek van het bedrijf een rol: zolang de magazijninfrastructuur onderhevig blijft aan uitbreidingen en herstructureringen worden verder investeringen in complexe automatiseringsoplossingen uitgesteld. De

introductie van automatisering bij e-power heeft geleid tot heroriëntatie van magazijnpersoneel eerder dan tot personeelsreductie. Medewerkers die vroeger voltijds betrokken waren bij manuele picking werden ingezet voor aanvullende taken zoals stocktelling, ondersteuning van inkomende goederenstromen en kwaliteitscontrole. Door een transparante communicatie over de doelstellingen en implicaties van automatisering, en door te vermijden dat technologie rechtstreeks leidde tot jobverlies, slaagde e-power erin om de attitude van de werknemers positief te houden. De meeste magazijnmedewerkers ervaren de technologische veranderingen als een verbetering van hun werkcomfort en als een mogelijkheid tot taakvariatie. Dit draagt bij aan een bredere acceptatie van verdere innovatie binnen de organisatie.

De tweede respondent is Senior Project Supervisor binnen het warehouse reborn team van Toyota Parts Center Europe. Dit distributiecentrum, gevestigd in Diest, maakt deel uit van Toyota Motor Europe en staat in voor de opslag en wereldwijde verdeling van originele Toyota- en Lexus-onderdelen. Vanuit deze centrale logistieke hub worden meer dan 60 landen beleverd waaronder zowel Europese markten als bestemmingen in Afrika en het Midden-Oosten. Binnen zijn functie is de respondent actief betrokken bij de modernisering en optimalisering van warehouseprocessen. Er ligt een specifieke focus op de integratie van geavanceerde technologieën. Hij werkt onder meer met automatische scanoplossingen, autonome mobiele robots (AMR) en automated guided vehicles (AGV). Deze technologieën worden ingezet met het oog op het verhogen van de efficiëntie, nauwkeurigheid en veiligheid binnen de magazijnoperaties.

Toyota Parts Center Europe met zijn logistieke site in België, maakt deel uit van de internationale Toyota Group en opereert binnen de automobielsector. De specifieke functie van deze vestiging is gericht op de distributie vervangingsonderdelen (spare parts) naar een uitgebreid netwerk van officiële Toyota-dealers verspreid over heel Europa. Het magazijn fungeert dus als een centrale schakel in het Europese onderdelenbeheer van het merk. De hoofdactiviteit van het magazijn is het efficiënt beheren van de inkomende goederenstroom, het stockeren van onderdelen en het uitvoeren van order picking voor verzending naar het dealernetwerk. Het bedrijf richt zich uitsluitend op de B2B-markt waarbij directe leveringen aan eindconsumenten worden vermeden. Dit vereist een doorgedreven focus op snelheid, beschikbaarheid en betrouwbaarheid van leveringen aan professionele partners.

De magazijnsite van Toyota is qua schaalgrootte en operationele complexiteit een van de meest geavanceerde binnen de sector. De totale opslagruimte bedraagt ongeveer 100.000 vierkante meter, verdeeld over verschillende zones waarin dagelijks wordt gewerkt door circa 800 medewerkers. Deze medewerkers zijn voornamelijk betrokken bij het order pickproces, het binden van pakketten, het verzendklaar maken van orders en het intern transport van goederen. Binnen het magazijn wordt een functioneel onderscheid gemaakt tussen small, medium en large parts. Afhankelijk van het type onderdeel is een specifieke logistieke behandeling en aangepaste strategie voor het picken vereist. Zo worden kleine onderdelen voornamelijk manueel gepickt met karren, terwijl voor zwaardere of volumineuzere stukken scooters worden ingezet om de fysieke afstanden sneller te overbruggen. Hoewel exacte aantallen SKU's niet werden gegeven, blijkt dat Toyota werkt met een zeer breed assortiment van onderdelen. Door de diversiteit gaande van eenvoudige bevestigingsmiddelen tot breekbare

autoruiten en zware batterijmodules worden er specifieke eisen gesteld aan zowel opslaginrichting als pickingprocessen.

De orderverwerking bij Toyota gebeurt momenteel grotendeels handmatig, met uitzondering van een belangrijke geautomatiseerde component: het Automatic High Bay-systeem (AHB). Dit systeem is een parts-to-picker oplossing waarbij reserveonderdelen automatisch via een verticale lift en dynamisch opslagsysteem naar een vaste operatorlocatie worden gebracht ter optimalisatie van het pickproces. Dit systeem automatiseert de opslag en het ophalen van goederen hoge rekken waardoor de fysieke belasting voor de werknemers vermindert. Dit systeem zorgt ook voor een verhoogde snelheid tijdens het picken. Naast deze bestaande automatisering is Toyota momenteel bezig met het project 'Warehouse Reborn' waarin verdere automatisering centraal staat. Binnen dit project bevindt de toepassing van Autonomous Mobile Robots (AMR's) en automatische scanningsoplossingen zich nog in de evaluatiefase, waarbij hun potentiële bijdrage aan toekomstige automatiseringstrajecten wordt afgewogen. Hiermee beoogt Toyota zowel de interne transporten efficiënter te organiseren, de foutmarge te verlagen en het verzendproces verder te stroomlijnen. Automatisering wordt dus ingezet als versterking van bestaande processen, zonder deze volledig te vervangen.

Toyota implementeert automatisering binnen haar magazijnprocessen om strategisch in te spelen op structurele uitdagingen zoals ruimtegebrek, stijgende arbeidsdruk en een stijgende productdiversiteit. De organisatie beschouwt automatisering niet louter als een kostengedreven maatregel maar als een integrale hefboom om zowel operationele efficiëntie als ergonomische omstandigheden te verbeteren. Zo leidt de inzet van automatische opslagsystemen tot een optimaler gebruik van magazijnruimte wat cruciaal is in een context waar fysieke uitbreiding niet mogelijk is. Daarnaast maken autonome mobiele robots (AMR's) het mogelijk om arbeidskrachten vrij te maken voor meerwaarde creërende activiteiten zoals picking en kwaliteitscontrole. Ook ergonomie en veiligheid worden versterkt door toepassingen zoals vacuümheffers en automatische scansystemen. Deze zorgen dat de fysieke belasting en risico's voor medewerkers worden verlaagd. Automatisering resulteert bovendien in economische voordelen waaronder een vermindering van operationele kosten en een verhoging van de verwerkingscapaciteit. Hierbij wilt Toyota specifieke ROI-drempels hanteren die afhankelijk zijn van de schaal van het project. Tegelijkertijd erkent Toyota dat automatisering beperkingen heeft. Technologische kwetsbaarheid, zoals de inflexibiliteit van conveyorsystemen en de vereiste van en een robuuste IT-infrastructuur (zoals een compatibel WMS), vormen belangrijke aandachtspunten. Verder moeten systemen flexibel genoeg zijn om zich aan te passen aan veranderende productmixen, zoals zwaardere componenten in elektrische voertuigen. Ook de menselijke factor speelt een rol: medewerkers moeten voldoende opgeleid worden om met nieuwe technologieën om te gaan, wat een culturele omslag vraagt. Volledige automatisering wordt dan ook bewust vermeden. Menselijke flexibiliteit blijft volgens Toyota essentieel in situaties van uitzonderingsbehandeling en complexe handling. Bij de beslissing om automatiseringsprojecten te implementeren, weegt Toyota zowel economische als operationele criteria af: van ROI en kostprijs tot integratiemogelijkheden met bestaande infrastructuur, veiligheid, schaalbaarheid en toekomstbestendige

flexibiliteit. Deze integrale benadering toont aan dat automatisering bij Toyota gericht is op complementariteit tussen mens en machine, eerder dan op vervanging.

De derde respondent is Manager Warehouse bij H.Essers. Dit familiebedrijf, met hoofdzetel in Genk is een van de grootste logistieke dienstverleners in België en biedt geïntegreerde transport- en logistieke oplossingen voor diverse sectoren in heel Europa. Binnen het magazijnbeheer is de respondent verantwoordelijk voor de aansturing van het operationele team en het dagelijkse operaties binnen de warehouse-omgeving. Zijn takenpakket omvat onder meer het personeelsbeheer, de dagelijkse operationele aansturing en het waarborgen van de veiligheid op de werkvloer. Daarnaast ligt de nadruk sterk op het monitoren en optimaliseren van kritieke prestatie-indicatoren zoals de renteratio en de opbrengst per gewerkte uur per FTE. Ook het beheersen en minimaliseren van operationele kosten vormt een belangrijk aandachtspunt in zijn functie. Door deze combinatie van leidinggevende, financiële en operationele verantwoordelijkheden speelt hij een sleutelrol in het efficiënt en kosteneffectief organiseren van de magazijnactiviteiten binnen het bedrijf.

H.Essers is een toonaangevende dienstverlener (Logistics Service Provide – LSP) met hoofdzetel in Genk. De onderneming is actief in uiteenlopende sectoren zoals chemie, farma, industrie en consumentengoederen. Dankzij deze sectorale diversificatie beschikt het bedrijf over ruime ervaring met gespecialiseerde logistieke processen en regelgeving. De interviewsite richt zich hoofdzakelijk op de logistieke activiteiten voor AkzoNobel, een wereldspeler op het vlak van verf- en coatingproducten. Binnen deze context worden meerdere complexe logistieke operaties uitgevoerd zoals inbound en outbound warehousing. Daarnaast wordt er aan tijdelijke opslag van ADR-goederen (gevaarlijke stoffen) uitgevoerd, relabeling van producten, luchtvrachtverwerking via een International Air Transport Association (IATA)-gecertificeerde kooi en het tinten van verf op klantvraag. Het operationele beheer wordt ondersteund door een intern ontwikkeld systeem, genaamd JEF, dat naadloos communiceert met het SAP-systeem van de klant. Deze integratie maakt een continue gegevensuitwisseling mogelijk wat essentieel is voor een efficiënte en klantgerichte uitvoering. De dienstverlening omvat zowel B2B- als B2C-markten, afhankelijk van de noden en commerciële strategie van de individuele klant of business unit.

De magazijnsite bestaat uit meerdere hallen met een gedifferentieerde inrichting op basis van producteigenschappen en risicoklassen. In totaal worden ongeveer 35.000 SKU's beheerd, die een breed gamma aan producten omvatten. Van verfpotten geschikt voor piece picking tot industriële drums van 200 liter en klein materiaal zoals borstels en persoonlijke beschermingsmiddelen (PBM). De organisatie telt op deze locatie circa 200 medewerkers. De opslagstructuur is geoptimaliseerd naar veiligheid en efficiëntie met zones die specifiek zijn ingericht voor hoge Seveso-producten. Bij Seveso-bedrijven worden gevaarlijke stoffen geproduceert, verwerkt, behandelt of opgeslaan. Hiervoor zijn er compartimenten die uitgerust zijn met Early Suppression Fast Response (ESFR) blussystemen en opslaggebieden voor licht ontvlambare materialen (light foam zones) om de veiligheid te garanderen. Elk van deze zones voldoet aan strikte veiligheidsvoorschriften, met onder meer fysieke scheidingen tussen incompatibele stoffen. Deze veiligheidsvoorschriften staan in voor het vervoer van gevaarlijke

goederen over de weg; L'Accord relatif au transport international de marchandises Dangereuses par Route; (ADR). Deze indeling zorgt ervoor dat risicobeheer en regelgeving integraal verweven zijn met de dagelijkse operationele praktijk.

Hoewel H.Essers over een brede technologische infrastructuur beschikt, is de automatiseringsgraad binnen het order pickproces relatief beperkt. In één van de hallen 15A, is een Verticale Lift Module (VLM) operationeel voor het geautomatiseerd opslaan en picken van circa 1.200 SKU's kleine artikelen. De keuze voor deze technologie werd ingegeven door het potentieel tot ruimtebesparing, verhoogde ergonomie en een significante efficiëntiewinst (+60%). Het gebruik van de VLM is echter beperkt tot niet-ADR artikelen met lage rotatie- en volumewaarden. In andere delen van het magazijn is de automatisering voornamelijk zichtbaar in de verpakkingsfase, waar automatische en semiautomatische wikkellijnen worden ingezet. Het kernproces van order picking blijft daarentegen grotendeels manueel, onder meer vanwege de diversiteit aan producttypes, verpakkingseisen en ADR-vereisten.

Binnen H.Essers biedt automatisering duidelijke voordelen op het vlak van operationeel efficiëntie, ergonomie en kwaliteit. Enerzijds zorgt de Verticale Lift Module (VLM) voor een efficiëntere order picking van kleine onderdelen en een verminderde fysieke belasting van werknemers. Anderzijds versterken automatische wikkellijnen de outboundcapaciteit aanzienlijk (tot wel 350 pallets per dag) zonder in te boeten op verpakkingskwaliteit of veiligheid. Deze technologieën verhogen niet alleen de uniformiteit en betrouwbaarheid van het eindproduct, wat de klanttevredenheid ten goede komt maar versterken ook de werkbaarheid van functies die traditioneel repetitief of fysiek belastend zijn. Automatisering wordt dan ook niet louter vanuit een kostenperspectief benaderd maar evenzeer als een strategisch middel om de duurzame inzetbaarheid van personeel te bevorderen. Toch wordt de verdere uitrol van automatisering geconfronteerd met meerdere structurele beperkingen. De hoge mate van procesvariabiliteit bemoeilijkt de standaardisatie en verhindert de schaalvoordelen die automatisering doorgaans veronderstelt. Dit wordt veroorzaakt door de uiteenlopende logistieke vereisten van tientallen klanten op één site. Daarnaast stellen producten met specifieke veiligheidsvoorschriften, zoals ADR-goederen of zware drums, bijkomende eisen aan infrastructuur en technologie. De noodzakelijke investeringen in gespecialiseerde rekken, robuuste vloeren of geavanceerde software zijn vaak moeilijk te verantwoorden zonder stabiele volumes of langetermijncontracten. Bovendien vereist het garanderen van bedrijfscontinuïteit robuuste fail-safe scenario's en back-upoplossingen, wat de complexiteit en kosten verder verhoogt. Vanuit deze context hanteert H.Essers een pragmatische en projectmatige benadering van automatisering waarbij haalbaarheid, schaalbaarheid en return on investment centraal staan. Automatisering wordt prioritair overwogen bij gestandaardiseerde processen, homogene producten en voorspelbare klantrelaties. In dynamischere settings geeft men de voorkeur aan modulaire, herbruikbare oplossingen die de operationele wendbaarheid behouden. Wat betreft de impact op het personeel van H.Essers leidt automatisering niet tot een reductie van tewerkstelling maar eerder tot een herpositionering van functies. Werknemers die vrijgemaakt worden van repetitieve taken worden polyvalent inzetbaar in andere magazijnactiviteiten wat bijdraagt aan hun werktevredenheid en competentieontwikkeling. Tegelijkertijd groeit de behoefte aan technische profielen, zoals

systeembeheerders en AI-specialisten. H.Essers anticipeert hierop via gerichte opleidingstrajecten en strategische initiatieven, waaronder een interne taskforce rond artificiële intelligentie en digitale innovatie. Deze werkgroep verkent de mogelijkheden van technologie binnen zowel warehousing als transport en illustreert de toekomstgerichte visie van de organisatie, waarin automatisering integraal deel uitmaakt van de langetermijnstrategie.

De vierde respondent is Distributiemanager bij een grote speler in de kledingsector. Het Europees logistiek centrum van het bedrijf, gelegen in Antwerpen. Dit vormt een cruciale schakel in de wereldwijde supply chain van het merk en verzorgt de distributie van sportkledij, schoenen en accessoires naar retail- en e-commerceklanten in Europa, het Midden-Oosten en Afrika. Binnen deze context is de respondent verantwoordelijk voor het aansturen van de dagelijkse operationele processen in het distributiecentrum. Zijn functie omvat onder meer het realiseren van procesverbeteringen, het monitoren van kritische prestatie-indicatoren (KPI's) en het waarborgen van een efficiënte flow van goederen. Daarnaast speelt people management een centrale rol in zijn takenpakket, waarbij het motiveren en ontwikkelen van medewerkers essentieel is voor het behalen van de operationele doelstellingen. Zijn rol bevindt zich op het snijvlak van operationeel management en strategische optimalisatie waarbij continue verbetering en prestatiegericht leiderschap centraal staan binnen een sterk geautomatiseerde en data gedreven logistieke omgeving.

Het bedrijf is een internationale onderneming die actief binnen de kleding- en schoensector. Het bedrijf richt zich zowel op de B2C- als de B2B-markt. Aan de ene kant worden producten rechtstreeks aan consumenten geleverd via de eigen webshops en fysieke winkels. Aan de andere kant levert het bedrijf ook aan retailpartners waardoor het distributienetwerk tweeledig georganiseerd is. Deze hybride structuur vraagt om een verfijnde logistieke operatie waarin snelheid, accuraatheid en flexibiliteit centraal staan. Binnen hun magazijnomgeving ligt de nadruk op order picking maar daarnaast worden er ook value-added services (VAS) aangeboden. Deze services omvatten onder andere het aanbrengen van labels op kledingstukken en het aanpassen van de verpakking volgens specifieke klantvereisten. Deze diensten worden geïntegreerd binnen het distributieproces en vragen een zekere mate van maatwerk, afhankelijk van het type klant en de bestemming van het product. De combinatie van picking en VAS vereist een magazijnwerking die zowel gestroomlijnd als flexibel is. Daarnaast wijst de aanwezigheid van deze VAS-activiteiten op een geavanceerd niveau van logistieke dienstverlening.

Het Europese logistieke netwerk van het kledingbedrijf omvat vijf distributiecentra waarvan het centrum wat we bespreken ongeveer 101.000 SKU's beheert. Deze omvang geeft een indicatie van de complexiteit van de voorraadstructuur en vereist een robuust systeem voor opslag, picking en verzending. De operationele capaciteit van dit magazijn is aanzienlijk met ongeveer 900 medewerkers tijdens weekdays en een bijkomende 250 in het weekend. Wat aantoont dat het centrum voorbereid is op seizoens- of piekvariaties in werkvolume. De aard van de producten in het magazijn varieert sterk, gaande van gestandaardiseerde schoendozen tot onregelmatige artikelen zoals dikke winterjassen, sokken, petten of golftassen. Schoenen worden gestandaardiseerd verpakt in dozen van vaste afmetingen, terwijl kledingstukken zoals jassen, broeken petten en accessoires uiteenlopende vormen

en afmetingen hebben. Sommige artikelen zijn fragiel of moeilijk stapelbaar, zoals golftassen of hoofddeksels die niet mogen vervormen. Deze productdiversiteit heeft een directe impact op de wijze van opslag, order picking en materiaalstromen binnen het magazijn. Dergelijke diversiteit aan SKU's vereist een dynamisch en flexibel magazijnontwerp en order pickingsysteem. Voor specifieke, waardevolle of exclusieve producten maakt het kledingbedrijf gebruik van zogenaamde "hotseats": locaties binnen het magazijn die speciaal gereserveerd zijn voor gevoelige goederen. Deze locaties bevinden zich op zichtbare plekken in de werkvloer zodat leidinggevenden toezicht kunnen houden. De plaatsing van deze producten in hotseats bevordert niet alleen de veiligheid en controle maar ook de snelheid van verwerking voor snel verkopende items.

Het vierde bedrijf past in zijn distributiecentra een systeem van gedeeltelijke automatisering toe. Niet alle processen worden geautomatiseerd maar waar het zinvol en technisch haalbaar is, worden manuele processen ondersteund of vervangen door machines. Bij het kledingbedrijf wordt het order picken gekenmerkt door een sterk doorgedreven automatiseringsgraad, aangevuld met manuele interventies waar nodig. Kleine en gestandaardiseerde producten worden hoofdzakelijk verwerkt via een geautomatiseerd conveyor bandsysteem, dat de goederen naar specifieke pickstations transporteert. Op deze pickstations voeren operatoren handmatige picks uit volgens het parts-to-picker-principe, wat de loopafstanden aanzienlijk reduceert en de ergonomie bevordert. De High Bay van het magazijn is uitgerust met een shuttlesysteem dat automatisch kartonnen dozen ophaalt op het moment dat deze nodig zijn in het pickingproces. Deze dozen bevatten meestal meerdere eenheden van dezelfde SKU en worden automatisch uit het opslaggebied gehaald en via conveyors naar een handmatige zone getransporteerd. Daarna worden deze dozen manueel verwerkt in de Low Bay, waar order pickers individuele items verzamelen volgend klantorders. Voor producten die niet geschikt zijn voor volledige automatisering, zoals volumineuze of afwijkende artikelen, worden manuele pickzones ingezet waar order pickers zich te voet verplaatsen. Dit hybride systeem laat het bedrijf toe om flexibiliteit te behouden binnen een sterk geoptimaliseerd logistiek proces waarbij snelheid, nauwkeurigheid en schaalbaarheid centraal staan.

De volgende fase van het proces, de sortering van artikelen per klantorder, gebeurt opnieuw automatisch met behulp van een sequencer machine. Deze machine groepeerd verschillende gepickte items uit verschillende zones en leidt ze in de juiste volgorde naar het verpakkingsstation. Voor bestellingen die slechts één artikel bevatten, wat frequent voorkomt in e-commerce, beschikt het magazijn over een automatische verpakkingsmachine. Deze machine detecteert de afmetingen van het artikel en verpakt het in een op maat gemaakt verzendverpakking. Ondanks deze technologische ondersteuning blijft het eigenlijke pickingproces grotendeels manueel uitgevoerd. De reden hiervoor ligt in de hoge productdiversiteit en het feit dat niet alle items gemakkelijk door machines kunnen worden gehanteerd.

De keuze van het bedrijf om bepaalde processen te automatiseren is ingegeven door de wens om operationele efficiëntie te verbeteren, verwerkingssnelheid te verhogen en fouten te minimaliseren. Zo laat het geautomatiseerde shuttlesysteem toe om sneller toegang te krijgen tot opgeslagen goederen, terwijl de sequencer machine bijdraagt aan een correcte samenstelling van klantorders. Toch kiest het

kleidingbedrijf ervoor om automatisering enkel daar in te zetten waar het proces voldoende gestandaardiseerd is. Bepaalde processen blijven bewust manueel, bijvoorbeeld de verwerking van kledingstukken die los verpakt zijn, of value-added services zoals labelen en het ophangen van kleding. De variabiliteit van deze processen, zowel in taakinhoud als in fysieke eigenschappen van het product, maakt geautomatiseerde verwerking moeilijk en vaak inefficiënt. Eerdere experimenten met geautomatiseerde pickingrobots bij schoenen(doen) bleken technisch uitvoerbaar, maar bleken de doorloopsnelheid van het proces negatief te beïnvloeden. Hierdoor heeft het bedrijf beslist om deze piste voorlopig niet verder te ontwikkelen. In plaats daarvan zet het bedrijf in op hybride aanpak. Waarbij geautomatiseerde systemen samenwerken met menselijke operators, afgestemd op de aard van het product en de complexiteit van het proces.

3.2 Bespreking diepte-interviews

In dit onderdeel worden de resultaten van de diepte-interviews gepresenteerd. Deze interviews zijn afgenomen bij een selectie van bedrijfsvertegenwoordigers met directe ervaring in het beheer of de automatisering van magazijnprocessen. Door deze kwalitatieve methode werd beoogd om diepgaande inzichten te verkrijgen in de beweegredenen en overwegingen die bedrijven hanteren bij het (al dan niet) automatiseren van hun magazijnen. In tegenstelling tot de literatuur die vaak generieke voordelen en nadelen van automatisering belicht. Deze gesprekken bieden een genuanceerd beeld van praktijkervaringen en context specifieke afwegingen. De interviews behandelen thema's zoals de motieven achter automatiseringsbeslissingen, bepalende factoren zoals kosten, technologische beschikbaarheid, return on investment (ROI), personeel en vereiste flexibiliteit. Verder werd gepeild naar de aard van de goederen en magazijnprocessen die betrokken zijn bij de beslissing tot automatisering, evenals de gekozen oplossingen. Enkele kernvragen die hierbij centraal stonden waren onder andere:

- Waarom willen bedrijven automatiseren, en waarom juist niet?
- Welke factoren beïnvloeden hun beslissing (kosten, technologie, flexibiliteit, ROI, personeel)?
- Welke producten en magazijnprocessen spelen een rol in de automatiseringsbeslissing?
- Welke specifieke automatiseringsoplossing hebben ze gekozen en waarom?
- Hebben bedrijven al plannen voor verdere automatisering? Zo niet, wat houdt hen tegen?

3.3 Reflectie op de literatuur

3.3.1 Type automatisering en gebruikt OPS-systemen

In de literatuurstudie wordt een onderscheid gemaakt tussen de vijf types order pickingsystemen (OPS) waaronder het part-to-picker-systeem dat sterk afhankelijk is van geautomatiseerde systemen zoals een Verticale Lift Module (zie sectie 2.11.4). Bij e-power is deze technologie reeds operationeel voor een deel van de kleine onderdelen. Zoals in de literatuur beschreven biedt dit systeem belangrijke voordelen: beperkte fysieke belasting, snellere picktijd, verhoogde nauwkeurigheid en optimale benutting van

verticale ruimte. e-power bevestigt deze voordelen in het interview. Bovendien wordt de VLM ingezet voor batch picking waardoor meerdere orders tegelijk kunnen worden verwerkt – een efficiëntievoordeel dat ook in de literatuur wordt benadrukt als typisch voor geavanceerde OPS-oplossingen. Daarnaast gebruikt e-power voornamelijk het picker-to-parts-systeem.

Toyota heeft reeds gedeeltelijk geïnvesteerd in magazijnautomatisering via de implementatie van een Automatic High Bay systeem. Deze aanpak stemt overeen met het parts-to-picker principe zoals uiteengezet in sectie 2.5. Het Automatic High Bay systeem brengt reserveonderdelen automatisch naar de operators waardoor de reistijd voor order pickers aanzienlijk wordt verminderd. Toyota zet deze technologie in om een verhoogde pickefficiëntie en een betere benutting van de opslagruimte te behalen. Toyota zet strategisch in op de geleidelijke implementatie van AMR's, automatische scansystemen en autonome transportmiddelen, die steeds meer als alternatief worden ingezet voor traditionele vaste conveyor systemen.

In sectie 2.5 van de literatuurstudie worden 5 types orderpicking systemen onderscheiden, waaronder het parts-to-picker-principe dat sterk afhankelijk is van geautomatiseerde opslag en ophaal systemen zoals de Verticale Lift Module (VLM). Bij H.Essers is enkel in hal 15 a een VLM geïnstalleerd, specifiek voor het verwerken van kleine, niet-gevaarlijke producten. Dit bevestigt de bevinding in sectie 2.11.4 dat VLM-technologie vooral geschikt is voor kleine onderdelen met een hoge rotatiesnelheid. Volgens het internet kan de inzet van deze technologie een aanzienlijke efficiëntiewinst opleveren (+60% pickrendement), wat overeenkomt met de bevindingen die in de literatuur worden beschreven. Daarbij worden voordelen gerealiseerd zoals verhoogde pick nauwkeurigheid, minder loopafstanden, lagere foutenmarge en beter ruimtegebruik. Tegelijkertijd blijft het aandeel van geautomatiseerde OPS-systemen bij H.Essers beperkt tot een marginale toepassing. In tegenstelling tot bedrijven als Toyota, waar parts-to-picker volledig geïntegreerd is in de logistieke flow, hanteert H.Essers hoofdzakelijk een picker-to-parts-systeem, zoals beschreven in sectie 2.5. Deze hybride aanpak benadrukt het selectieve karakter van automatisering en omgevingen met hoge variabiliteit en complexe klantenstructuren (zie sectie 2.6).

Het vierde bedrijf maakt gebruik van een combinatie van deels geautomatiseerde systemen die geïntegreerd zijn in een hybride logistieke keten. De High Bay is voorzien van een automatisch shuttlesysteem (AS/RS) dat kartonnen dozen met SKU's ophaalt op basis van vraag. Deze dozen worden vervolgens manueel verplaatst naar de Low Bay, waar order pickers de gewenste artikelen verzamelen. De artikelen worden daarna geautomatiseerd gesorteerd via een sequencer machine die afzonderlijke items groepeerd per klantorder en ze juiste volgorde naar een verpakkingsstation leidt. Voor e-commercebestellingen die slechts één item bevatten wordt een autopack machine gebruikt. Deze verpakt het artikel automatisch in een doos op maat. Hoewel het pickproces dus grotendeels manueel blijft, toont deze combinatie van systemen duidelijk de toepassing van hybride automatisering. Hierbij worden repetitieve en standaardiseerbare taken overgelaten aan technologie en complexe, variabele handelingen door mensen worden uitgevoerd. Dit komt overeen met wat in sectie 2.5 wordt beschreven als het 'best-of-both-worlds'-principe in order picking.

3.3.2 Motivaties voor automatisering

De belangrijkste drijfveer voor automatisering bij e-power was kostenbesparing via tijdswinst en reductie van manuele arbeid. Deze motieven sluiten aan bij de strategische redenen voor magazijnautomatisering die besproken werden in sectie 2.8 van de literatuurstudie. Automatisering wordt hier benaderd als een investering die gericht is op operationele efficiëntie, foutreductie en concurrentievoordeel. Er moet rekening gehouden worden met de noodzaak om strategische investeringen zorgvuldig af te wegen op basis van terugverdientijd en schaalbaarheid. Daarom heeft e-power een rendementsanalyse uitgevoerd en is pas overgegaan tot investering na deze berekening.

De motivatie voor verdere automatisering bij Toyota is de combinatie van businessgroei en ruimtebeperkingen. Dit dwingt hen om met innovatieve technologieën meer output te genereren binnen de bestaande infrastructuur. Deze motivatie sluit nauw aan bij de strategische beweegredenen voor magazijnautomatisering zoals besproken in sectie 2.11 van de literatuurstudie. Hierin bespreken we dat bedrijven automatiseren om de capaciteit te verhogen, doorlooptijden te verlagen en operationele efficiëntie te verbeteren. Kostenefficiëntie wordt bij Toyota wel als bijkomend voordeel genoemd, dit is dus niet de primaire drijfveer. In de literatuur zien we dat strategische voordelen soms zwaarder wegen dan louter kostenbesparing. Toyota kijkt eerder naar capaciteitsvergroting binnen de bestaande infrastructuur.

In sectie 2.10 van de literatuurstudie worden verschillende strategische en operationele drijfveren voor magazijnautomatisering besproken, waaronder kostenbesparing, ergonomieverbetering, foutreductie en capaciteitstoename. Bij H.essers liggen de motivaties voornamelijk op het operationele vlak. Zo werd de automatische wikkellijn ingevoerd om de verwerkingssnelheid te verhogen en fysieke belasting van de operatoren te reduceren. Beide motieven worden in de literatuur als korte termijn winsten bekeken (zie sectie 2.10). In tegenstelling tot de strategische automatiseringsaanpak bij Toyota, waar groei en ruimteoptimalisatie centraal staan, hanteert H.Essers een zuiver kosten-batenmodel. Pas wanneer de ROI overtuigend is, wordt een investering overwogen. Dit sluit aan bij het standpunt in sectie 2.10, waar beschreven wordt automatisering vaak enkel overwogen wordt indien het systeem schaalbaar is en toepasbaar over meerdere klanten heen. Automatisering is geen universele oplossing en omdat H.Essers verschillende klanten heeft onder hetzelfde magazijn is dit moeilijk om te implementeren. Er zijn verschillende workflows die worden gehanteerd voor de verschillende klanten waardoor automatisering minder geoptimaliseerd is voor een logistieke dienstverlener. Automatisering als strategische hefboom is voor H.Essers ondergeschikt aan de dagelijkse flexibiliteitsvereisten binnen hun multiklantenomgeving.

De voornaamste motivatie van het vierde bedrijf om te automatiseren is het verhogen van de snelheid en efficiëntie binnen het distributieproces. Door de inzet van het shuttlesysteem wordt de opslagcapaciteit geoptimaliseerd en de tijd die nodig is om goederen te picken verkort. De sequencer machine zorgt op zijn beurt voor een foutloze en snelle ordergroepering. Daarnaast is het kledingbedrijf hierdoor minder afhankelijk van fluctuerende arbeidskrachten tijdens piekperiodes, zoals tijdens promoties of feestdagen. Automatisering maakt het mogelijk om op constante capaciteit te blijven

functioneren los van externe schommelingen in personeelsaanbod. Deze motivaties sluiten aan bij de literatuur in sectie 2.9, waar automatisering wordt gekaderd als een strategisch middel om operationele snelheid en betrouwbaarheid te verhogen. Ook de analyse van schaalbaarheid, foutreductie en stabiliteit tijdens pieken zoals besproken in sectie 2.10 komt volledig overeen met de praktijk bij het bedrijf.

3.3.3 Beperkingen en grenzen van automatisering

De diversiteit van de producten bij e-power vormt een rem op verdere automatisering. Grote variatie in SKU's, frequent veranderende magazijnflows en volumineuze, niet gestandaardiseerde producten maken volledige automatisering moeilijk. Dit bevestigt de stelling in sectie 2.9 en 2.10 dat automatisering vooral rendabel en haalbaar is in omgevingen met een hoge mate van standaardisatie, herhaalbare processen en vaste flows. De literatuur benadrukt dat bij heterogene magazijnomgevingen met hoge variabiliteit zoals bij e-power, manuele systemen of hybride oplossingen vaak noodzakelijk blijven.

Toyota benadrukt dat de diversiteit in het productassortiment automatisering complex maakt. De nood om flexibele systemen te gebruiken zoals AMR's in plaats van vaste conveyors. Dit toont aan dat standaardisatie een belangrijke voorwaarde blijft voor succesvolle automatisering wat besproken wordt in de secties 2.9 en 2.10. Hierin beschrijven we dat een hoge variabiliteit in SKU's en processen de rendabiliteit van automatisering onder druk zet. Toyota anticipeert hierop door technologieën te kiezen die schaalbaar en aanpasbaar zijn aan toekomstige veranderingen zoals de opkomst van elektrische voertuigen met nieuwe onderdelenprofielen.

Secties 2.9 en 2.12 van de literatuur wijzen expliciet op de beperkingen van automatisering in contexten met hoge product-, klant- en procesvariabiliteit. H.Essers vormt hier een schoolvoorbeeld van. Het magazijn wordt frequent aangepast aan ADR-klassen, nieuwe klanten en wisselende productvereisten, waardoor vaste automatiseringsstructuren (zoals conveyors of AGV's) zelden zinvol zijn. Deze bevinding is in lijn met de literatuur waarin gesteld wordt dat geautomatiseerde processen op maat vooral werken in omgevingen met homogene stromen en weinig wijzigende processen (sectie 2.9).

Hoewel automatisering in sommige delen van het proces een duidelijke meerwaarde biedt, ondervindt het vierde bedrijf ook grenzen aan de toepasbaarheid ervan. Vooral processen die een hoge variabiliteit of lage standaardisatiegraad vertonen zijn moeilijk te automatiseren. Bij deze taken denken we aan het ophangen van kleding, labelaanpassingen of andere value-added services. Eerdere testen met pickingrobots voor schoenen(doen) toonden weliswaar technische haalbaarheid, maar leverden onvoldoende winst op qua snelheid en leverbetrouwbaarheid. Daarom werd dit initiatief stopgezet. Dit is consistent met de inzichten in sectie 2.6 waar gesteld wordt dat automatisering enkel rendabel is in processen met hoge herhaalbaarheid, voorspelbaarheid en beperkte complexiteit. Ook sectie 2.9 benadrukt dat de mate van productstandaardisatie bepalend is voor de succesgraad van automatisering.

3.3.4 Systeemgrenzen en foutgevoeligheid

e-power gebruikt een ERP-systeem (Odoo) in combinatie met scanners maar ondervindt moeilijkheden met menselijke fouten die niet automatisch door het systeem worden herkend. Dit fenomeen wordt in

de literatuur erkend als een zwakte van gedeeltelijk geautomatiseerde systemen. Zonder strikte foutcontrole en validatiemechanismen in de IT-infrastructuur gaan de voordelen van automatisering teniet door menselijke onnauwkeurigheden. E-power overweegt daarom de invoering van real-time foutdetectie om de systeemintegriteit te verbeteren.

In de huidige situatie benadrukt Toyota het belang van een performante IT-infrastructuur. In het bijzonder een Warehouse Management System dat als fundamentele randvoorwaarde voor succesvolle automatisering dient. De nieuwe automatisering moet aansluiten op het systeem, en het systeem moet de verwerkingen van de automatisering kunnen uitvoeren. In sectie 2.9 bespraken we dat magazijnautomatisering zonder degelijke digitale ondersteuning (realtime foutdetectie en geautomatiseerde stockupdates) leidt tot inefficiënties en nieuwe foutbronnen. Toyota's nadruk op voorbereidende IT-investeringen bevestigt dat automatisering niet op zichzelf kan staan maar ingebed moet worden in een geïntegreerd softwaresysteem.

In sectie 2.9 wordt gewaarschuwd voor de risico's van geautomatiseerde systemen zonder voldoende integratie in het bredere IT-systeem. H.Essers erkent deze risico's: systeemuitval, onderhoudskosten en complexiteit van WMS-integratie worden als belangrijke bezorgdheden genoemd. Er is bij H.Essers geen sprake van kritische afhankelijkheid op automatisering, net omdat de organisatie steeds een manueel alternatief achter de hand wil houden (back-up bij stroompannes, systeemfouten, enz.). Dit beleid weerspiegelt het inzicht dat redundantie en foutbestendigheid cruciale voorwaarden zijn bij automatisering in kritieke supply chains. Sectie 2.12 beschrijft dat in high-pressure logistieke omgevingen het ontbreken van robuuste failsafe-mechanismen kan leiden tot disproportionele verstoringen in de keten. H.Essers tracht dit te vermijden door automatisering bewust te beperken tot niet-kritieke processen zoals verpakking.

Het vierde bedrijf geeft aan dat geautomatiseerde systemen, zoals de shuttle en de sequencer, bijdragen aan een hogere inventory accuracy, omdat ze fouten door menselijke handelingen voorkomen. Echter bij een technische storing of fout in het systeem, is het detecteren en corrigeren van het probleem aanzienlijk tijdrovender dan bij manuele operaties. Dit sluit aan bij sectie 2.11, waarin de kwetsbaarheid van sterk geautomatiseerde systemen besproken wordt. Hoewel de structurele foutkans lager ligt, kunnen de gevolgen van fouten ernstiger zijn, en is aanpassing aan onverwachte situaties vaak complexer en trager.

3.3.5 Impact op personeel en werkorganisatie

In de literatuur (sectie 2.12) wordt het belang van training, taakverdeling en acceptatie van personeel bij automatiseringsprojecten benadrukt. E-power toont een praktijkvoorbeeld waarbij medewerkers niet werden vervangen maar herverdeeld naar andere taken. Dit voorkomt weerstand en draagt bij aan een positievere perceptie van automatisering. Bovendien werd er geïnvesteerd in opleiding voor het gebruik van de VLM, in overeenstemming met aanbevelingen in de literatuur om technologische transitie te begeleiden met gerichte training.

De implementatie van nieuwe technologieën bij Toyota heeft duidelijke gevolgen voor de organisatie van arbeid. Automatisering van intern transport via AMR's zal enerzijds zorgen voor een heroriëntatie van personeel naar kerntaken zoals picking en verpakken. Anderzijds worden er nieuwe ondersteunende functies gecreëerd voor het beheer en onderhoud van geautomatiseerde systemen. Dit sluit volledig aan bij sectie 2.12 waar gesteld wordt dat automatisering niet noodzakelijk leidt tot personeelsreductie maar eerder tot taakverschuiving en de creatie van nieuwe functies. Toyota's positieve benadering waarbij ergonomie en werkcomfort vooropstaan, illustreert hoe automatisering ook kan bijdragen aan de tevredenheid en veiligheid van werknemers.

Volgens sectie 2.12 van de literatuurstudie beïnvloedt automatisering de aard van werk in plaats van het aantal jobs. Deze stelling wordt door H.Essers bevestigd. De introductie van automatische systemen leidde niet tot afvloeiingen, maar tot taakherverdeling. Zo kregen sommige medewerkers nieuwe rollen als operatoren van wikkellijnen of als technici voor onderhoud. Er werd ook geïnvesteerd in training, wat aansluit bij aanbevelingen in de literatuur om technologische veranderingen te begeleiden met gerichte opleidingen. Bovendien wordt automatisering bij H.Essers ook ingezet als ergonomisch hulpmiddel, bijvoorbeeld om tilwerk te beperken. Dit sluit aan bij de Human-centered benadering zoals beschreven in sectie 2.12 waarin automatisering ook wordt gezien als hefboom voor werkcomfort en veiligheid, niet enkel als efficiëntiemiddel. Volgens

Het vierde bedrijf heeft automatisering niet geleid tot het schrappen van arbeidsplaatsen, maar eerder tot heroriëntatie van functies. Werknemers uit geautomatiseerde zones worden ingezet in andere delen van het magazijn waar hun inzet meerwaarde creëert, zoals bij kwaliteitscontroles of complexe manuele bewerkingen. Wel merkt men dat sommige werknemers gehecht zijn aan specifieke taken die verdwijnen wat tijdelijke ontevredenheid of aanpassing kan veroorzaken. Toch ervaart men in het algemeen een goed draagvlak voor automatisering. Deze bevindingen zijn in lijn met de analyse in sectie 2.12, waar wordt benadrukt dat automatisering de aard van werk transformeert, eerder dan het volledig te vervangen. De rol van opleidingen, taakverschuiving en change management komt daar eveneens aan bod als kritieke succesfactor voor succesvolle integratie van technologie.

3.3.6 Voorwaarden voor toekomstige automatisering

e-power overweegt het gebruik van AGV's voor intern transport naar productie maar stelt deze beslissing uit totdat de magazijnflow en locatie-indeling gestabiliseerd zijn. Deze terughoudendheid weerspiegelt het inzicht uit sectie 2.19 en sectie 2.11.5 waarin gesteld wordt dat AGV-implementaties pas effectief zijn wanneer de fysieke lay-out en de logistieke flow voldoende vastliggen. Dit toont aan dat e-power de beperkingen van technologie erkent en een gefaseerde, doordacht aanpak hanteert, wat aanbevolen wordt door verschillende studies.

Toyota hanteert strikte ROI-criteria voor automatiseringsprojecten: een terugverdientijd van maximaal twee jaar voor kleinere projecten en vijf jaar voor grotere projecten. Deze pragmatische aanpak is in lijn met de richtlijnen in de literatuur. Hierin staat dat investeringsbeslissingen gebaseerd moeten worden op een duidelijke kosten-batenanalyse en een haalbare terugverdientijd. Toyota bevestigt dat grotere

strategische voordelen zoals ruimteoptimalisatie en toekomstige flexibiliteit soms belangrijker zijn dan pure kostenreductie.

In sectie 2.10 beschrijft de literatuur dat bedrijven hogere eisen stellen aan de ROI van automatiseringsinvesteringen. H.Essers volgt dit patroon nauwgezet: een automatisering wordt pas overwogen als deze rendabel is over meerdere klanten en processen heen. Maatwerkautomatisering voor één klant wordt slechts overwogen bij uitzonderlijk lange contracten (25-30 jaar), wat zelden voorkomt in hun marktsegment. Dit bevestigt de stelling dat schaalvoordelen en contractduur bepalende factoren zijn voor automatiseringsbeslissingen in hun context. De investeringslogica bij H.Essers is dus consistent met de literatuur en weerspiegelt de terughoudendheid die typisch is voor dienstverleners die flexibiliteit en klantendiversiteit centraal stellen.

Het vierde bedrijf werkt momenteel aan twee nieuwe automatiseringprojecten: (1) de automatische ontlading van trailers via robotarmen en (2) de automatisering van het orderplanningsproces via real-time order streaming. Beide projecten hebben als doel om fysieke belasting te verlagen, doorlooptijden te verkorten en de menselijke interventie verder te beperken. Deze evolutie sluit aan bij de trend van proces brede automatisering zoals besproken in sectie 2.9. Hierbij worden niet enkel picking maar ook inbound, planning en synchronisatie van materiaalstromen geautomatiseerd om een volledige end-to-end efficiëntie te bereiken.

3.3.7 Standaardisatie als voorwaarde voor automatisering

e-power introduceerde recent een nieuwe productielijn met slechts drie vaste types generatoren. Deze lijn wordt beschouwd als een mogelijke kandidaat voor verdere automatisering. Dit sluit aan bij sectie 2.11 en 2.12 waar gesteld wordt dat standaardisatie en een beperkte productvariatie de implementatie van automatisering faciliteren. Het toont aan dat e-power de lessen uit praktijk en theorie toepast door automatisering enkel te overwegen in afgebakende, gestandaardiseerde deelprocessen.

Een opvallende keuze van Toyota is het vermijden van traditionele conveyors ten voordele van flexibele AMR-technologie. De argumentatie dat een defecte conveyor de volledige flow stillegt, terwijl een defecte AMR eenvoudig kan worden omgeleid, toont een diep begrip van operationele veerkracht. Dit inzicht sluit aan bij de aanbevelingen in sectie 2.10 en 2.11.5, waar flexibiliteit en aanpasbaarheid als kritische succesfactoren worden genoemd voor moderne magazijnautomatisering.

In sectie 2.9 wordt het spanningsveld tussen standaardisatie en klantgerichtheid uitgebreid besproken. H.Essers probeer dit dilemma te beheersen door een "Essers-standaard" in te voeren die ongeveer 60 tot 80% van hun operationele processen dekt. Klantspecifieke aanpassingen worden enkel doorgevoerd indien de klant bereid is hiervoor te betalen. Deze aanpak illustreert hoe standaardisatie niet noodzakelijk ten koste hoeft te gaan van flexibiliteit, zolang het kader duidelijk afgebakend is. De literatuur stelt dat dit type 'platformdenken' cruciaal is voor bedrijven die willen balanceren tussen efficiëntie en maatwerk (sectie 2.10). In tegenstelling tot Toyota, waar de infrastructuur gericht is op een specifiek productassortiment en dus volledig geautomatiseerd kan worden blijft H.Essers opereren in een context

van continue verandering. Automatisering krijgt er bij gevolg een ondersteunende, eerder dan strategische rol.

Het vierde bedrijf automatiseert enkel processen die aan strikte standaardisatiecriteria voldoen. Schoendozen, die altijd in gelijke afmetingen verpakt zijn, lenen zich uitstekend voor shuttles en geautomatiseerde sortering. Kleding daarentegen met haar variabele vormen en verpakking wordt bewust niet geautomatiseerd vanwege de complexiteit in handling. Deze case bevestigt de stelling in sectie 2.6 waar benadrukt wordt dat product- en processtandaardisatie een fundamentele randvoorwaarde is voor het succesvol toepassen van automatiseringstechnologieën. Ook in sectie 2.9 wordt beklemtoond dat systeemkeuzes afhankelijk zijn van het niveau van uniformiteit binnen het productassortiment.

De vier onderzochte cases illustreren hoe bedrijven in verschillende sectoren en met uiteenlopende logistieke structuren omgaan met magazijnautomatisering. Hoewel de mate van automatisering varieert, zijn er duidelijke parallellen waarneembaar in motivaties, beperkingen en strategische overwegingen. Tegelijk tonen de cases belangrijke verschillen in de manier waarop automatisering wordt toegepast, afgestemd op de aard van de producten, operationele volumes, infrastructuur en bedrijfsdoelstellingen. Deze empirische inzichten worden hieronder systematisch vergeleken met de theoretische kaders uit de literatuur. Allereerst valt op dat het kledingbedrijf en Toyota het verst gevorderd zijn op het vlak van magazijnautomatisering. Beide bedrijven maken gebruik van geavanceerde parts-to-picker-systemen, zoals een geautomatiseerd shuttlesysteem en Automatic High Bay-systeem. Deze toepassingen sluiten nauw aan bij de literatuur (zie secties 2.6 en 2.11), waarin parts-to-picker-concepten worden geprezen voor hun capaciteit om pickefficiëntie te verhogen door de reistijd van medewerkers te minimaliseren. Bovendien plannen beide bedrijven de implementatie van AMR's voor intern transport, een keuze die volgens de literatuur getuigt van een strategische voorkeur voor schaalbare en flexibele technologieën die zich goed lenen tot dynamische en veranderlijke magazijnomgevingen.

Daartegenover staan e-power en H.Essers, twee bedrijven die eerder beperkte vormen van automatisering toepassen. E-power investeerde in een Verticale Lift Module en werkt met scanning gekoppeld aan een ERP-systeem, terwijl H.Essers zich beperkt tot een VLM voor kleingoed en enkele geautomatiseerde wikkellijnen. Beide bedrijven blijven sterk afhankelijk van manuele picking. Volgens de literatuur is dergelijke terughoudendheid verklaarbaar wanneer er sprake is van een lage standaardisatie, een hoge productvariatie of operationele complexiteit. Deze elementen zijn in beide bedrijven expliciet aanwezig. Zo ondervindt H.Essers moeilijkheden door ADR-goederen met verschillende veiligheidsklassen, variabele SKU-volumes en een voortdurend wijzigende productmix, terwijl e-power werkt met een diversiteit aan artikelen die gaan van een bout van twee cent tot motoren van twintigduizend euro.

Wat betreft de motieven voor automatisering valt op dat alle bedrijven efficiëntiewinst en arbeidsoptimalisatie als kernredenen vermelden. Dit komt overeen met de theoretische modellen over automatisering als strategische keuze. Toch zijn er nuanceringen, bij Toyota wordt automatisering expliciet ingegeven door een structurele ruimtebeperking. Wat een vrij unieke reden vormt om te

automatiseren binnen de praktijk. Bij het kledingbedrijf ligt de nadruk dan weer op snelheid en capaciteitsvergroting, gezien de grote volumes en de nood aan een stabiele verwerking van e-commerceorders. E-power automatiseert vooral vanuit de wens om fouten te reduceren en kosten te besparen, terwijl H.Essers automatisering vooral inzet ter ondersteuning van ergonomie, bijvoorbeeld bij zware goederen of in het verpakken van paletten.

De beperkingen waarmee bedrijven geconfronteerd worden bij het automatiseren van magazijnprocessen zijn grotendeels terug te voeren op inzichten uit de literatuur (zie 2.9 en 2.12). Een eerste belangrijke beperking betreft technologische randvoorwaarden, zoals een robuuste IT-infrastructuur en een krachtig WMS-systeem. Zowel Toyota als het kledingbedrijf bevestigen dat zonder een goed geconfigureerd WMS verdere automatisering onmogelijk is. Dit komt overeen met de bevindingen in de literatuur, die een zwakke IT-onderbouw aanduiden als cruciale faalfactor bij automatisering. Een tweede belemmering is de stijfheid van bepaalde technologieën. Zo vermijden Toyota en het kledingbedrijf bewust het gebruik van vaste conveyorsystemen, die bij defecten een gehele goederenstroom kunnen blokkeren. Dit risico wordt uitvoerig besproken in de literatuur. In plaats daarvan kijken zij naar modulaire en onderhoudsvriendelijke AMR-oplossingen om in de toekomst hun operationele processen te optimaliseren. Bij e-power blijkt uit het interview dat het ERP-systeem onvoldoende foutmeldingen genereert, wat leidt tot onnauwkeurige stockgegevens en een hoge administratieve werklast. H.Essers benadrukt vooral de inflexibiliteit van automatisering in contexten waar klanten specifieke eisen en snelle herinrichting van magazijnruimtes essentieel zijn, een bekend probleem met een gevarieerd klantenportfolio.

Wat de impact op personeel betreft, sluit de praktijk goed aan bij het concept van mens-robot samenwerking zoals beschreven in sectie 2.12. Bij geen enkel bedrijf werd automatisering doorgevoerd met de intentie om banen te schrappen. Integendeel, in alle gevallen leidde automatisering tot heroriëntatie van personeel naar andere taken, zoals stockbeheer (e-power), ondersteunende functies voor automatiseringssystemen (Toyota, kledingbedrijf) of meer klantgerichte processen. H.Essers benadrukt hierbij ook de nood aan gespecialiseerde technici voor onderhoud en interventie bij falende systemen. Een element dat minder wordt aangehaald in de literatuur maar in de praktijk van groot belang blijkt te zijn.

Ten slotte worden ook economische afwegingen zoals ROI expliciet benoemd in de interviews. Zowel Toyota als het kledingbedrijf hanteren duidelijke ROI-doelstellingen: twee tot vijf jaar afhankelijk van de schaal van het project. Het kledingbedrijf vermeldt bijvoorbeeld dat een shuttlesysteem over een periode van 10 jaar moet worden terugverdien, met een functionele levensduur van circa 25 jaar. Deze benadering komt sterk overeen met de literatuur, waarin ROI-analyses en TCO (total cost of ownership) centraal staan bij de afweging tot automatisering. E-power geeft aan dat hun investering in een VLM na ongeveer drie jaar terugverdiend was, terwijl H.Essers dat investeringen enkel doorgevoerd worden wanneer klanten zich langdurig engageren, wat de financieringsdynamiek bij logistieke dienstverleners onderstreept.

Wat betreft strategie en flexibiliteit valt ten slotte op dat het kledingbedrijf en Toyota actief sturen op toekomstgericht schaalbaarheid, bijvoorbeeld door de voorkeur te geven aan AMR's boven statische systemen zoals conveyors. Dit sluit aan bij aanbevelingen in de literatuur om automatisering modulair en schaalbaar op te bouwen. H.Essers daarentegen erkent de meerwaarde van automatisering, maar beschouwt het als onhaalbaar binnen hun logistiek model, tenzij de klant een langdurige commitment aangaat en de producttypes voldoende gestandaardiseerd zijn.

De vier case tonen aan dat magazijnautomatisering in de praktijk sterk contextafhankelijk is en enkel rendabel en werkbaar blijkt wanneer de randvoorwaarden voldoende gunstig zijn. Deze randvoorwaarden zijn de producthomogeniteit, standaardisatie van goederen, volumes, ruimte-infrastructuur en IT-systemen. Bedrijven zoals Toyota en het kledingbedrijf streven naar strategische integratie van technologie om snelheid, ruimtegebruik en capaciteit te optimaliseren, opereren bedrijven zoals H.Essers en e-power eerder tactisch en selectief. Deze empirische bevindingen bevestigen grotendeels de theoretische modellen rond automatisering, maar wijzen ook op enkele praktijkgerichte nuances. Zoals het belang van ergonomie, klantgestuurde investeringsbereidheid en het blijvende belang van menselijke flexibiliteit in hybride systemen.

4 Conclusie en verder onderzoek

4.1 Algemene conclusie

Deze masterproef onderzocht hoe automatisering binnen magazijnen, en meer specifiek binnen het order pickingproces, zich manifesteert in de praktijk en welke factoren de keuze voor specifieke automatiseringstechnologieën bepalen. We bekijken welke drijfveren en belemmeringen een rol spelen in de besluitvorming en in hoeverre deze keuzes overeenkomen met academische modellen en theorieën. In het eerste deel van deze studie werd aan de hand van functionele, technologische en strategische dimensies van magazijnautomatisering beschrijft.

Een eerste belangrijke vaststelling uit de literatuur is dat het magazijn steeds vaker wordt benaderd als een strategische schakel in de waardeketen. Traditioneel lag de focus op kostenverlaging en standaardisatie maar recente literatuur benadrukt dat magazijnen ook dienen als flexibele hubs die moeten inspelen op veranderende klantverwachtingen, kortere doorlooptijden en mass customization. Automatisering wordt daarbij niet langer enkel als een technische of economische keuze beschouwd maar als een strategische ingreep die nauw verbonden is met bedrijfsdoelstellingen, personeelsbeleid en digitale maturiteit. De literatuurstudie bracht ook een duidelijke typologie van order pickingsystemen in kaart. Deze werden onderscheiden in manuele, semi-geautomatiseerde en volledig geautomatiseerde systemen. Er werd geargumenteed dat elk systeem specifieke voordelen en nadelen kent in termen van foutgevoeligheid, snelheid, ergonomie en ROI. De keuze voor een bepaald OPS hangt nauw samen met productkarakteristieken zoals SKU-diversiteit, volume, waarde en fragiliteit. Daarnaast belichtte de literatuur ook technologische innovaties zoals VLM's, shuttlesystemen, AGV's en AMR's met aandacht voor hun functionele toepassingsgebied en strategische implicaties waaronder schaalbaarheid, IT-integratie en onderhoudsvereisten. Een derde belangrijk luik binnen de theoretische verkenning behandelde de menselijke factor. De literatuur wijst erop dat mens-robot samenwerking niet alleen operationele voordelen oplevert maar ook vereist dat organisaties investering in opleiding, en veiligheidsstructuren. Ook ergonomie wordt hierin meegenomen als een motief voor automatisering niet louter als neveneffect. Tot slot werd het belang van ROI-berekeningen en gefaseerde implementatieplannen benadrukt waarbij investeringen zowel vanuit financieel als operationeel perspectief worden beoordeeld. Wanneer deze uitgebreide literatuur wordt vergeleken met de resultaten uit het empirisch onderzoek blijkt dat er aanzienlijke overlap bestaat tussen theorie en praktijk, zij met enkele nuances.

Op basis van een uitgebreide literatuurstudie en vier diepte-interviews met bedrijven uit verschillende sectoren, zijn diverse inzichten opgedaan over de impact, voordelen en uitdagingen van magazijnautomatisering. De vergelijking tussen de praktijksituaties en de theoretische modellen maakt het mogelijk om conclusies te formuleren met betrekking tot de toepasbaarheid en effectiviteit van automatiseringsstrategieën in uiteenlopende logistieke contexten. Eerst en vooral bevestigen de bevindingen dat automatisering in magazijnen een strategisch instrument is dat verder reikt dan enkel

kostenbesparing. Hoewel initiële investeringskosten en terugverdientijden (ROI) een belangrijk criterium blijven in de besluitvorming, blijkt uit de praktijk dat bedrijven automatisering in de eerst plaats beschouwen als een middel om procesoptimalisatie, snelheid, foutreductie en operationele betrouwbaarheid te realiseren. Bedrijven zoals Toyota en het kledingbedrijf tonen aan dat automatisering essentieel is om tegemoet te komen aan de eisen van hedendaagse supply chains, waarin korte levertijden, foutloze leveringen en schaalbaarheid centraal staan. Deze bevinding sluit aan bij de theorie die stelt dat strategische motieven zoals marktpositionering en klanttevredenheid steeds meer de drijfveer zijn achter technologische investeringen, eerder dan louter financiële baten. De praktijk bevestigt eveneens het theoretisch inzicht dat automatisering niet louter een technologische keuze is maar ook sterk verweven is met de bredere bedrijfsstrategie, de fysieke infrastructuur en de aard van de producten en processen. Zo bleek uit het interview met het kledingbedrijf dat de keuze om bepaalde flows te automatiseren sterk afhankelijk is van producthomogeniteit. Standaardproducten zoals schoendozen lenen zich perfect tot geautomatiseerde opslag- en sorteersystemen (zoals het shuttlesysteem en de sequencer machine), terwijl kleding, vanwege zijn vorm, textuur en vereiste handling minder geschikt is voor volautomatische verwerking. Dit sluit aan bij de literatuur die productvariabiliteit als een van de grootste belemmeringen voor volledige automatisering identificeert.

Een andere vaststelling uit de casestudies is dat schaalbaarheid en flexibiliteit vaak de doorslag geven in de keuze van automatiseringstechnologie. Toyota gaf bijvoorbeeld aan bewust te kijken naar AMR's boven traditionele conveyors, precies omdat deze beter kunnen omgaan met veranderende lay-outs, SKU-assortimenten en volumeschommelingen. Deze voorkeur voor modulaire en adaptieve systemen weerspiegelt het theoretisch model dat stelt dat investeringen in automatisering pas duurzaam zijn indien ze voldoende toekomstbestendig en schaalbaar zijn. Op het vlak van arbeidsorganisatie blijkt dat automatisering in geen enkel van de onderzochte bedrijven leidde tot directe reductie van jobs. Integendeel, er wordt eerder ingezet op taakherverdeling en ondersteuning van fysieke arbeid, onder andere via ergonomische hulpmiddelen zoals vacuümheffers of automatische wikkelstations. Deze aanpak weerspiegelt het principe van mens-robot samenwerking waarbij technologie niet de werknemer vervangt maar diens werk veiliger en efficiënter maakt. Vooral in fysieke logistieke omgevingen waar repetitieve of belastende taken vaak leiden tot blessures of vermoeidheid, wordt automatisering dan ook gewaardeerd als een ergonomische meerwaarde.

Tot slot is het belangrijk op te merken dat ook de ergonomische benadering van automatisering een evolutie doormaakt. Het kledingbedrijf en e-power maakten duidelijk dat een ROI-berekening niet altijd de doorslag geeft. Wanneer een systeem bijvoorbeeld zorgt voor significante verbeteringen in snelheid, betrouwbaarheid of klanttevredenheid kan dit toch als een rendabele investering worden beschouwd. Het feit dat bedrijven bereid zijn te investeren in systemen met een terugverdientijd van tien jaar, indien dit leidt tot structurele capaciteitsverhoging en minder afhankelijkheid van schommelende personeelsvolumes, getuigt van een volwassen kijk op technologische innovatie.

Samenvattend kan gesteld worden dat magazijnautomatisering in de praktijk niet louter een kwestie is van technologie of kosten maar een complex beslissingsproces dat rekening houdt met strategische,

operationele, menselijke en technologische factoren. De praktijkcases ondersteunen de theoretische modellen maar tonen ook aan dat flexibiliteit, schaalbaarheid en producteigenschappen bepalende factoren zijn in de uiteindelijke keuze voor automatisering. De evolutie richting slimme, hybride systemen waarin mens en technologie complementair samenwerken lijkt daarbij de dominante trend voor de toekomst.

4.2 Beperkingen van het onderzoek

Hoewel dit onderzoek waardevolle inzichten heeft opgeleverd over de implementatie, motivaties en grenzen van automatisering in magazijnomgevingen, zijn er ook enkele fundamentele beperkingen verbonden aan de onderzoeksopzet. Een eerste belangrijke beperking is de omvang van het empirisch luik. De studie baseert zich op vier diepte-interviews met bedrijven uit verschillende sectoren wat weliswaar kwalitatief rijke data oplevert maar de externe validiteit van de bevindingen beperkt. Door de kleinschaligheid van het onderzoek kunnen de resultaten niet zomaar worden gegeneraliseerd naar de volledige logistieke sector of naar andere geografische contexten. Dit geldt des te meer omdat alle onderzochte bedrijven gevestigd zijn in België wat de overdraagbaarheid van de bevindingen naar bijvoorbeeld Aziatische of Noord-Amerikaanse logistieke omgevingen verder beperkt.

Een tweede beperking betreft de gekozen onderzoeksmethode. De kwalitatieve aanpak via semigestructureerde interviews laat toe om de processen, ervaringen en keuzes van bedrijven diepgaand te analyseren, maar biedt minder ruimte voor generaliseerbare uitspraken of statistische onderbouwing. De mogelijkheid om correlaties of causale verbanden te leggen tussen bijvoorbeeld magazijn grootte en automatiseringsgraad is hierdoor beperkt. De resultaten zijn dan ook eerder indicatief dan representatief wat typisch is voor een exploratief onderzoek. Daarnaast speelt ook het tijdsgebonden karakter van het onderzoek een rol. Technologieën binnen warehouse management en logistieke automatisering evolueren snel net als de marktomstandigheden waarin bedrijven opereren. Wat vandaag als innovatief of grensverleggend wordt beschouwd kan over enkele jaren als standaard gelden waardoor de relevantie van bepaalde bevindingen kan verschuiven. De interviews geven een momentopname weer en zijn dus afhankelijk van de huidige maturiteit van zowel de technologie als de bedrijfsstructuren.

Tot slot is het onderzoek inhoudelijk afgebakend tot de functionele dimensie van automatisering met de focus op picking, intern transport en ergonomie. Belangrijke complementaire thema's zoals de technologische integratie met ERP- en WMS- systemen, de rol van big data en voorspellende analyses, alsook juridische en ethische implicaties van automatisering zijn buiten beschouwing gebleven. Deze domeinen zijn echter eveneens van strategisch belang bij een succesvolle automatisering van magazijnoperaties en verdienen verdere aandacht.

4.3 Suggesties voor verder onderzoek

De onderzoeksbevindingen in deze thesis bieden een bruikbaar uitgangspunt voor vervolgonderzoek dat dieper kan ingaan op de complexiteit van magazijnautomatisering in een bredere bedrijfscontext. Een eerste aanbeveling is om kwantitatief vervolgonderzoek te voeren, bijvoorbeeld via grootschalige enquêtes bij logistieke dienstverleners en productiebedrijven. Hiermee kan statistisch onderzocht worden

in hoeverre factoren zoals sector, grootte van het magazijn, SKU-diversiteit of type product bepalend zijn voor het soort automatisering dat wordt gekozen. Een dergelijke benadering zou toelaten om patronen en correlaties bloot te leggen die in dit kwalitatieve onderzoek enkel verkennend aan bod kwamen. Een tweede piste betreft het analyseren van change management en organisatorische aanpassing tijdens automatiseringstrajecten. Verschillende geïnterviewde bedrijven benadrukten de nood aan opleiding, heroriëntatie en begeleiding van personeel bij de invoering van nieuwe systemen. Toekomstig onderzoek kan bestuderen hoe bedrijven omgaan met weerstand bij medewerkers, hoe trainingsprogramma's worden ingericht en welke communicatiestrategieën bijdragen aan een vlotte adoptie van technologische innovaties.

Daarnaast kan het ontwikkelen van economische simulatiemodellen waardevol zijn om de investeringsbeslissingen rond automatisering beter te onderbouwen. Door middel van kosten-batenanalyses en scenario-analyses kunnen bedrijven inzicht krijgen in de langetermijneffecten van investeringen, onder meer op vlak van ROI, personeelskosten en foutreductie. Dit zou ook kunnen helpen bij het objectiveren van beslissingscriteria, bijvoorbeeld bij de keuze tussen manuele processen, semi-automatisering of volledige automatisatie. Ook verdient het thema technologie-integratie verdere studie. Automatisering beperkt zich niet tot de fysieke installatie van robots of liften maar vereist een naadloze koppeling met bestaande WMS- en ERP-systemen. Vervolgonderzoek kan analyseren hoe deze integratieprocessen verlopen, welke obstakels bedrijven ervaren (zoals compatibiliteitsproblemen, datakwaliteit, of real-time tracking) en hoe deze effectief kunnen worden aangepakt.

Tot slot is er groeiende belangstelling voor het gebruik van artificiële intelligentie in magazijnbeheer. Toekomstige studies kunnen zich richten op hoe AI-algoritme ingezet worden voor orderplanning, voorraadbeheer en capaciteitsoptimalisatie. De combinatie van AI met automatisering opent perspectieven voor autonome besluitvorming binnen het magazijn, bijvoorbeeld via voorspellende analyse. Dergelijk onderzoek zou niet alleen bijdragen aan de academische kennis maar ook relevante inzichten bieden voor bedrijven die zich willen voorbereiden op een volgende golf van technologische innovatie.

5 Referentielijst

- AGV in uw magazijn SSI SCHÄFER. (z.d.). Geraadpleegd 15 mei 2025, van <https://www.ssi-schaefer.com/nl-be/producten/transportsystemen/automatisch-geleide-voertuigen>
- Ames, B. (2021, april 14). *Warehouse robots earn their diplomas* | DC Velocity. <https://www.dcvelocity.com/articles/50224-warehouse-robots-earn-their-diplomas>
- Azadeh, K., De Koster, R., & Roy, D. (2019). Robotized and Automated Warehouse Systems: Review and Recent Developments. *Transportation Science*, 53(4), 917-945. <https://doi.org/10.1287/trsc.2018.0873>
- Baker, P. (2004). Aligning Distribution Center Operations to Supply Chain Strategy. *The International Journal of Logistics Management*, 15(1), 111-123. <https://doi.org/10.1108/09574090410700266>
- Baker, P., & Halim, Z. (2007). An exploration of warehouse automation implementations: Cost, service and flexibility issues. *Supply Chain Management: An International Journal*, 12(2), 129-138. <https://doi.org/10.1108/13598540710737316>
- Bansal, V., Roy, D., & Pazour, J. A. (2021). Performance analysis of batching decisions in waveless order release environments for e-commerce stock-to-picker order fulfillment. *International Transactions in Operational Research*, 28(4), 1787-1820. <https://doi.org/10.1111/itor.12921>
- Bartholdi, J. J., & Hackman, S. T. (2018). *Warehouse & Distribution Science*.
- Basile, F., Chiacchio, P., & Del Grosso, D. (2012). A control oriented model for manual-pick warehouses. *Control Engineering Practice*, 20(12), 1426-1437. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2012.08.008>
- Casella, G., Volpi, A., Montanari, R., Tebaldi, L., & Bottani, E. (2023). Trends in order picking: A 2007–2022 review of the literature. *Production & Manufacturing Research*, 11(1), 2191115. <https://doi.org/10.1080/21693277.2023.2191115>
- Chen, C., Gong, Y., De Koster, R. B. M., & Van Nunen, J. A. E. E. (2010). A Flexible Evaluative Framework for Order Picking Systems. *Production and Operations Management*, 19(1), 70-82. <https://doi.org/10.1111/j.1937-5956.2009.01047.x>
- Chuang, Y.-F., Lee, H.-T., & Lai, Y.-C. (2012). Item-associated cluster assignment model on storage allocation problems. *Computers & Industrial Engineering*, 63(4), 1171-1177. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2012.06.021>
- Custodio, L., & Machado, R. (2020). Flexible automated warehouse: A literature review and an innovative framework. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(1-2), 533-558. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04588-z>
- Da Costa Barros, Í. R., & Nascimento, T. P. (2021). Robotic Mobile Fulfillment Systems: A survey on recent developments and research opportunities. *Robotics and Autonomous Systems*, 137, 103729. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2021.103729>
- Dadhich, P., Genovese, A., Kumar, N., & Acquaye, A. (2015). Developing sustainable supply chains in the UK construction industry: A case study. *International Journal of Production Economics*, 164, 271-284. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.12.012>
- Dadzie, K. Q., & Johnston, W. J. (1991, maart 1). *INNOVATIVE AUTOMATION TECHNOLOGY IN CORPORATE WAREHOUSING LOGISTICS*. | EBSCOhost. <https://openurl.ebsco.com/contentitem/gcd:9706191120?sid=ebsco:plink:crawler&id=ebsco:gcd:9706191120>
- Dallari, F., Marchet, G., & Melacini, M. (2009). Design of order picking system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 42(1-2), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1571-9>

- Davies, A., Oca, A., Prieto, I., & Sarilar, U. (2023, december 1). *Maximize ROI from warehouse robotics | McKinsey*. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/getting-warehouse-automation-right>
- De Koster, R., de Brito, M. P., & van de Vendel, M. A. (2002). Return handling: An exploratory study with nine retailer warehouses. *International Journal of Retail & Distribution Management*, 30(8), 407-421. <https://doi.org/10.1108/09590550210435291>
- De Koster, R., Johnson, A. L., & Roy, D. (2017). Warehouse design and management. *International Journal of Production Research*, 55(21), 6327-6330. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1371856>
- De Koster, R., Le-Duc, T., & Roodbergen, K. J. (2007). Design and control of warehouse order picking: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 182(2), 481-501. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.07.009>
- De Vries, J., De Koster, R., & Stam, D. (2016). Exploring the role of picker personality in predicting picking performance with pick by voice, pick to light and RF-terminal picking. *International Journal of Production Research*, 54(8), 2260-2274. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1064184>
- Dekker, R., De Koster, M. B. M., Roodbergen, K. J., & Van Kalveveen, H. (2004). Improving Order-Picking Response Time at Ankor's Warehouse. *Interfaces*, 34(4), 303-313. <https://doi.org/10.1287/inte.1040.0083>
- Dhaliwal, A. (2020). The Rise of Automation and Robotics in Warehouse Management. In *Transforming Management Using Artificial Intelligence Techniques*. CRC Press.
- Drury, J., Falconer, P., & Heery, G. (2003). *Buildings for Industrial Storage and Distribution* (2de dr.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780080548364>
- Ellithy, K., Salah, M., Fahim, I. S., & Shalaby, R. (2024). AGV and Industry 4.0 in warehouses: A comprehensive analysis of existing literature and an innovative framework for flexible automation. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY*, 134(1-2), 15-38. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14127-0>
- Fedorko, G., Honus, S., & Salai, R. (2017). Comparison of the Traditional and Autonomous AGV Systems. *MATEC Web of Conferences*, 134, 00013. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713400013>
- Fernández-Caramés, T. M., Blanco-Novoa, O., Froiz-Míguez, I., & Fraga-Lamas, P. (2019). Towards an Autonomous Industry 4.0 Warehouse: A UAV and Blockchain-Based System for Inventory and Traceability Applications in Big Data-Driven Supply Chain Management. *Sensors*, 19(10), 2394. <https://doi.org/10.3390/s19102394>
- Glock, C. H., Grosse, E. H., Abedinnia, H., & Emde, S. (2019). An integrated model to improve ergonomic and economic performance in order picking by rotating pallets. *European Journal of Operational Research*, 273(2), 516-534. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.08.015>
- Goetschalckx, M., & Ashayeri, J. (1989). CLASSIFICATION AND DESIGN OF ORDER PICKING. *Logistics World*, 2(2), 99-106. <https://doi.org/10.1108/eb007469>
- Grosse, E. H., Glock, C. H., & Neumann, W. P. (2017). Human factors in order picking: A content analysis of the literature. *International Journal of Production Research*, 55(5), 1260-1276. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1186296>
- Gu, J., Goetschalckx, M., & McGinnis, L. F. (2007). Research on warehouse operation: A comprehensive review. *European Journal of Operational Research*, 177(1), 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.02.025>
- Gunasekaran, A. (2001). *Agile Manufacturing: The 21st Century Competitive Strategy*. Elsevier.

- Ha, W. Y. (2024). The Characteristics of Cube Storage: AutoStore System. *2024 15th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, 391-394. <https://doi.org/10.1109/ICTC62082.2024.10826700>
- Ha, W. Y., Cui, L., & Jiang, Z.-P. (2021). A Warehouse Scheduling Using Genetic Algorithm and Collision Index. *2021 20th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, 318-323. <https://doi.org/10.1109/ICAR53236.2021.9659439>
- Ha, W. Y., & Jiang, Z.-P. (2023). Optimization of Cube Storage Warehouse Scheduling Using Genetic Algorithms. *2023 IEEE 19th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/CASE56687.2023.10260388>
- Ha, Y., & Chae, J. (2018). Free balancing for a shuttle-based storage and retrieval system. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 82, 12-31. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2017.12.006>
- Haase, J., & Beimborn, D. (2017). Acceptance of Warehouse Picking Systems: A Literature Review. *Proceedings of the 2017 ACM SIGMIS Conference on Computers and People Research*, 53-60. <https://doi.org/10.1145/3084381.3084409>
- Hackman, S. T., Frazelle, E. H., Griffin, P. M., Griffin, S. O., & Vlasta, D. A. (2001). Benchmarking Warehousing and Distribution Operations: An Input-Output Approach. *Journal of Productivity Analysis*, 16(1), 79-100. <https://doi.org/10.1023/A:1011155320454>
- Harrison, A., Hoek, R. V., Skipworth, H., & Aitken, J. (2019). *Logistics Management and Strategy*. Pearson UK.
- Herrero-Perez, D., & Matinez-Barbera, H. (2008). Decentralized coordination of autonomous AGVs in flexible manufacturing systems. *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 3674-3679. <https://doi.org/10.1109/IROS.2008.4650894>
- Hur, S., & Nam, J. (2006). Performance analysis of automatic storage/retrieval systems by stochastic modelling. *International Journal of Production Research*, 44(8), 1613-1626. <https://doi.org/10.1080/00207540500410176>
- Jenkins, A. (2024, november 4). *Warehouse Automation Explained: Trends, Types & Best Practices*. Oracle NetSuite. <https://www.netsuite.com/portal/resource/articles/inventory-management/warehouse-automation.shtml>
- Jovane, F., Koren, Y., & Boër, C. R. (2003). Present and Future of Flexible Automation: Towards New Paradigms. *CIRP Annals*, 52(2), 543-560. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60203-0](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60203-0)
- Keith, R., & La, H. M. (2024). *Review of Autonomous Mobile Robots for the Warehouse Environment* (No. arXiv:2406.08333). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.08333>
- Kelly, L. (2023). Re-politicising the future of work: Automation anxieties, universal basic income, and the end of techno-optimism. *Journal of Sociology*, 59(4), 828-843. <https://doi.org/10.1177/14407833221128999>
- Kembro, J., & Norrman, A. (2022). The transformation from manual to smart warehousing: An exploratory study with Swedish retailers. *The International Journal of Logistics Management*, 33(5), 107-135. <https://doi.org/10.1108/IJLM-11-2021-0525>
- Knudsen, M., & Kai Vo-Oja, J. (2020). Collaborative Robots: Frontiers of Current Literature. *Journal of Intelligent Systems: Theory and Applications*, 13-20. <https://doi.org/10.38016/jista.682479>
- Kučera, T. (2017). Logistics Cost Calculation of Implementation Warehouse Management System: A Case Study. *MATEC Web of Conferences*, 134, 00028. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713400028>

- Kumar, S., Narkhede, B. E., & Jain, K. (2021). Revisiting the warehouse research through an evolutionary lens: A review from 1990 to 2019. *International Journal of Production Research*, 59(11), 3470-3492. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1867923>
- Lambert, D., Stock, J. R., & Ellram, L. M. (1998). *Fundamentals of logistics management*. McGraw-Hill. <https://thuvienso.hoasen.edu.vn/handle/123456789/11058>
- Le-Duc, T., & De Koster, R. (2005). Determining Number of Zones in a Pick-and-pack Orderpicking System. *ERIM Report Series Research in Management Erasmus Research Institute of Management*, Article ERS-2005-029-LIS. <https://repub.eur.nl/pub/6555/>
- López, J., Pérez, D., Vaamonde, I., Paz, E., Vaamonde, A., & Cabaleiro, J. (2016). Building a Warehouse Control System Using RIDE. In L. P. Reis, A. P. Moreira, P. U. Lima, L. Montano, & V. Muñoz-Martinez (Red.), *Robot 2015: Second Iberian Robotics Conference* (Vol. 418, pp. 757-768). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27149-1_59
- Lu, W., McFarlane, D., Giannikas, V., & Zhang, Q. (2016). An algorithm for dynamic order-picking in warehouse operations. *European Journal of Operational Research*, 248(1), 107-122. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.06.074>
- Maltz, A. (2015). *Warehousing – The Evolution Continues*.
- Manzini, R., Gamberi, M., & Regattieri, A. (2006). Design and control of an AS/RS. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28(7), 766-774. <https://doi.org/10.1007/s00170-004-2427-6>
- Marchet, G., Melacini, M., & Perotti, S. (2015). Investigating order picking system adoption: A case-study-based approach. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 18(1), 82-98. <https://doi.org/10.1080/13675567.2014.945400>
- Oyekanlu, E. A., Smith, A. C., Thomas, W. P., Mulroy, G., Hitesh, D., Ramsey, M., Kuhn, D. J., Mcghinnis, J. D., Buonavita, S. C., Looper, N. A., Ng, M., Ng'oma, A., Liu, W., McBride, P. G., Shultz, M. G., Cerasi, C., & Sun, D. (2020). A Review of Recent Advances in Automated Guided Vehicle Technologies: Integration Challenges and Research Areas for 5G-Based Smart Manufacturing Applications. *IEEE Access*, 8, 202312-202353. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3035729>
- Ozturkoğlu, O., & Hoşer, D. (2019). An Evaluation of Order-picking Tour Efficiency in Two-block Warehouses. *Operations and Supply Chain Management: An International Journal*, 74-87. <https://doi.org/10.31387/oscm0370225>
- Pasparakis, A., de Vries, J., & de Koster, M. B. M. (2021). *In Control or under Control? Human-Robot Collaboration in Warehouse Order Picking* (SSRN Scholarly Paper No. 3816533). Social Science Research Network. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3816533>
- Petersen, C. G. (1997). An evaluation of order picking routeing policies. *International Journal of Operations & Production Management*, 17(11), 1098-1111. <https://doi.org/10.1108/01443579710177860>
- Petersen, C. G., Aase, G. R., & Heiser, D. R. (2004). Improving order-picking performance through the implementation of class-based storage. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 34(7), 534-544. <https://doi.org/10.1108/09600030410552230>
- Pfohl, H.-C., Zöllner, W. A., & Weber, N. (1992, maart 1). *ECONOMIES OF SCALE IN CUSTOMER WAREHOUSES: THEORETICAL AND EMPIRICAL ANALYSIS*. | EBSCOhost. <https://openurl.ebsco.com/contentitem/gcd:9707110973?sid=ebsco:plink:crawler&id=ebsco:gcd:9707110973>

- Pinto, A. R. F., Nagano, M. S., & Boz, E. (2023). A classification approach to order picking systems and policies: Integrating automation and optimization for future research. *Results in Control and Optimization*, 12, 100281. <https://doi.org/10.1016/j.rico.2023.100281>
- Poon, T. C., Choy, K. L., Chow, H. K. H., Lau, H. C. W., Chan, F. T. S., & Ho, K. C. (2009). A RFID case-based logistics resource management system for managing order-picking operations in warehouses. *Expert Systems with Applications*, 36(4), 8277-8301. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.10.011>
- Ratliff, H., & Rosenthal, A. (1983). Order-Picking in a Rectangular Warehouse—A Solvable Case of the Traveling Salesman Problem. *OPERATIONS RESEARCH*, 31(3), 507-521. <https://doi.org/10.1287/opre.31.3.507>
- Reif, R., & Günthner, W. A. (2009). Pick-by-vision: Augmented reality supported order picking. *The Visual Computer*, 25(5-7), 461-467. <https://doi.org/10.1007/s00371-009-0348-y>
- Reinke, C., & Beinschob, P. (2013). Strategies for contour-based self-localization in large-scale modern warehouses. *2013 IEEE 9th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP)*, 223-227. <https://doi.org/10.1109/ICCP.2013.6646112>
- Roodbergen, K. J., & De Koster, R. A. (2001). Routing methods for warehouses with multiple cross aisles. *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH*, 39(9), 1865-1883. <https://doi.org/10.1080/00207540110028128>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.01.038>
- Rouwenhorst, B., Reuter, B., Stockrahm, V., van Houtum, G. J., Mantel, R. J., & Zijm, W. H. M. (2000). Warehouse design and control: Framework and literature review. *European Journal of Operational Research*, 122(3), 515-533. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00020-X](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00020-X)
- Rowley, J., Thomson, I., & Croucher, P. (2008). *The Principles of Warehouse Design*. Institute of Logistics & Transport.
- Russell, M. L., & Meller, R. D. (2003). Cost and Throughput Modeling of Manual and Automated Order Fulfillment Systems. *IIE Transactions*, 35(7), 589-603. <https://doi.org/10.1080/07408170304358>
- Sainathuni, B., Parikh, P. J., Zhang, X., & Kong, N. (2014). The warehouse-inventory-transportation problem for supply chains. *European Journal of Operational Research*, 237(2), 690-700. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.02.007>
- Scholz, A., Henn, S., Stuhlmann, M., & Wäscher, G. (2016). A new mathematical programming formulation for the Single-Picker Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, 253(1), 68-84. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.02.018>
- Shivanand, H. K. (2006). *Flexible Manufacturing System*. New Age International.
- Silva, A., Coelho, L. C., Darvish, M., & Renaud, J. (2020). Integrating storage location and order picking problems in warehouse planning. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 140, 102003. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102003>
- Sullivan, M., & Kern, J. (2021). The Digital Transformation of Logistics. In *The Digital Transformation of Logistics* (pp. 405-434). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119646495.gloss>
- Tang, C. S., & Veelenturf, L. P. (2019). The strategic role of logistics in the industry 4.0 era. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 129, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.06.004>
- Tompkins, J. A., White, J. A., Bozer, Y. A., & Tanchoco, J. M. A. (2010). *Facilities Planning*. John Wiley & Sons.

- Van Geest, M., Tekinerdogan, B., & Catal, C. (2021). Smart Warehouses: Rationale, Challenges and Solution Directions. *Applied Sciences*, 12(1), 219. <https://doi.org/10.3390/app12010219>
- Van Hoek, R. I. (2001). The rediscovery of postponement a literature review and directions for research. *Journal of Operations Management*, 19(2), 161-184. [https://doi.org/10.1016/S0272-6963\(00\)00057-7](https://doi.org/10.1016/S0272-6963(00)00057-7)
- Varghese, J., Saju, S., & Sequeira, M. F. (2021). *Challenges while moving towards Warehouse Automation*.
- Winkelhaus, S., Grosse, E. H., & Morana, S. (2021). Towards a conceptualisation of Order Picking 4.0. *Computers & Industrial Engineering*, 159, 107511. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107511>
- Winkelhaus, S., Zhang, M., Grosse, E. H., & Glock, C. H. (2022). Hybrid order picking: A simulation model of a joint manual and autonomous order picking system. *Computers & Industrial Engineering*, 167, 107981. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.107981>
- Yamazaki, Y., Shigematsu, K., Kato, S., Kojima, F., Onari, H., & Takata, S. (2017). Design method of material handling systems for lean automation—Integrating equipment for reducing wasted waiting time. *CIRP Annals*, 66(1), 449-452. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.011>
- Yener, F., & Yazgan, H. R. (2019). Optimal warehouse design: Literature review and case study application. *Computers & Industrial Engineering*, 129, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.01.006>
- Yoon, C. S., & Sharp, G. P. (1996). A structured procedure for analysis and design of order pick systems. *IIE TRANSACTIONS*, 28(5), 379-389. <https://doi.org/10.1080/07408179608966285>
- Yu, Y., Wang, X., Zhong, R. Y., & Huang, G. Q. (2017). E-commerce logistics in supply chain management: Implementations and future perspective in furniture industry. *Industrial Management & Data Systems*, 117(10), 2263-2286. <https://doi.org/10.1108/IMDS-09-2016-0398>
- Zhang, M., Grosse, E. H., & Glock, C. H. (2023). Ergonomic and economic evaluation of a collaborative hybrid order picking system. *International Journal of Production Economics*, 258, 108774. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108774>
- Zhang, M., Winkelhaus, S., & Grosse, E. H. (2021). Evaluation of human workload in a hybrid order picking system. *IFAC-PapersOnLine*, 54(1), 458-463. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.08.053>
- Zhen, L., & Li, H. (2022). A literature review of smart warehouse operations management. *Frontiers of Engineering Management*, 9(1), 31-55. <https://doi.org/10.1007/s42524-021-0178-9>