



UHASSELT

KNOWLEDGE IN ACTION

Faculteit Bedrijfseconomische Wetenschappen

master handelsingenieur

Masterthesis

Het integreren van vaardigheden in planningsmodellen voor magazijnbeheer

Thibo Rerren

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

PROMOTOR :

Prof. dr. Kris BRAEKERS

BEGELEIDER :

De heer Thomas DE LOMBAERT



UHASSELT

KNOWLEDGE IN ACTION

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

2022
2023



Faculteit Bedrijfseconomische Wetenschappen

master handelsingenieur

Masterthesis

Het integreren van vaardigheden in planningsmodellen voor magazijnbeheer

Thibo Rerren

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

PROMOTOR :

Prof. dr. Kris BRAEKERS

BEGELEIDER :

De heer Thomas DE LOMBAERT

WOORD VOORAF

Deze masterproef werd geschreven in het kader van mijn masteropleiding tot Handelsingenieur met als afstudeerrichting 'Operationeel Management en Logistiek' aan de Universiteit Hasselt. Het onderwerp van deze masterproef - het integreren van vaardigheden in planningsmodellen voor magazijnbeheer - combineert mijn interesse voor de logistieke processen binnen een magazijn en het (wiskundig) modelleren van processen. Ik ben dan ook verheugd om deze masterproef af te leveren als het sluitstuk van mijn opleiding.

Het uitwerken van deze masterproef was een vermoeiend proces, met de nodige uitdagingen en moeilijkheden. Toch was het ook een boeiend en leerzaam proces, waarbij ik kon rekenen op de steun van verschillende mensen. Ik zou dan ook graag dit deel gebruiken om enkele personen te bedanken.

In de eerste plaats wens ik mijn promotor, prof. dr. Kris Braekers, te bedanken voor zijn steun en advies. Daarbij wens ik ook mijn copromoter, dhr. Thomas De Lombaert, te bedanken voor zijn ondersteuning en uitgebreide feedback.

Verder wil ik een speciaal woord van dank richten tot mij vrienden en familie, zij stonden altijd voor mij klaar, niet enkel tijdens het schrijven van deze masterproef, maar gedurende het hele verloop van mijn studies. Hierbij richt ik mij in het bijzonder tot mijn mama, aangezien zij mij de kans gaf een universitaire studie aan te vatten.

Ik wens u veel plezier bij het lezen van mijn masterproef en ik hoop dat u iets bijleert.

Thibo Rerren
Hasselt, januari 2023

SAMENVATTING

Met de groei van e-commerce, verkorte productlevenscycli en nieuwe concepten zoals "*Vandaag Bezorgd*" van Bol.com en zelfs "*2-hour delivery*" van Amazon Prime, neemt het belang van efficiënte logistieke processen steeds toe. Aangezien de processen binnen magazijnen een directe invloed hebben op de levertijd van producten is het belangrijk dat er daar een hoog niveau van efficiëntie wordt nagestreefd.

Eén van de meest arbeids-, tijds- en kapitaalintensieve activiteiten binnen magazijnbeheer is het orderpicken - het proces waarbij een magazijnmedewerker een lijst van producten uit het magazijn haalt en verzamelt voor verzending of intern gebruik. Dit OP proces gebeurt doorgaans nog manueel. Ten gevolge van de voorkeur voor manuele processen zijn deze uitgebreid onderzocht in de literatuur. De meeste planningsmodellen met als doel het ondersteunen van managementbeslissingen negeren echter de specifieke karakteristieken van werknemers. Dit leidt tot onrealistische planningen en suboptimale werkschema's. Om een hoge productiviteit en efficiëntie te waarborgen is het noodzakelijk menselijke factoren in acht te nemen. Voorbeelden hiervan zijn het vermogen om te leren en te vergeten, vermogen van fysieke belasting, lichaamshouding, etc. Ondanks dat recent onderzoek deze menselijke factoren opneemt in wiskundige modellen, is er nog steeds een grote kloof tussen de literatuur en de werkelijkheid. De vaardigheden van werknemers worden namelijk vaak genegeerd.

De centrale onderzoeksvraag van deze masterproef is dan ook: "Hoe kunnen vaardigheden geïntegreerd worden in planningsmodellen voor magazijnbeheer?" De methodologie van dit onderzoek is een literatuurstudie, met als doel de bestaande en de tekortkomingen daarvan te verkennen, gevolgd door een empirisch deel.

De literatuurstudie wordt aangevat met een bespreking van het order picking proces, met als doel een beter beeld te vormen omtrent de mogelijke planningsproblemen. Er worden drie niveaus onderscheiden, namelijk het strategisch, tactisch en operationeel niveau. Het strategisch niveau slaat op het uitwerken van de plannen en protocollen omtrent het gebruik van de middelen met als doel het vervullen van de competitieve strategie op lange termijn. Het tactisch niveau slaat op beslissingen die een impact hebben op middellange termijn. Het operationeel niveau slaat op de beslissingen omtrent de dagelijkse operaties.

Vervolgens wordt bekeken hoe de prestatie van modellen om deze planningsproblemen op te lossen, gemeten kan worden. Hierbij is de conclusie dat niet enkel economische aspecten, maar ook het welzijn van werknemers in rekening genomen kan worden. *Ergonomics* of de "wetenschappelijke discipline begaan met het begrijpen van de interacties tussen mensen en andere elementen van een systeem met als doel het welzijn van de mens en de prestaties van het systeem te verbeteren" vormt het onderwerp van het volgende hoofdstuk.

Verder worden vijf categorieën van menselijke factoren besproken, namelijk fysieke factoren, mentale factoren, perceptuele factoren, psychosociale factoren en vaardigheden. Wanneer deze factoren geïmplementeerd worden in planningsmodellen, kunnen ze de prestaties van het systeem en het welzijn van de werknemers verbeteren. Vaardigheden is de belangrijkste categorie voor dit onderzoek. Aangezien het een vaag begrip treft waarvan veel verschillende definities terug te vinden zijn, afhankelijk van de context, wordt er getracht een duidelijke afbakening op te stellen. Vervolgens wordt het begrip verduidelijkt met voorbeelden uit de literatuur. Er wordt kortweg gesteld dat een vaardigheid het vermogen is een bepaalde taak uit te voeren, vaardigheden verbeterd kunnen worden en dat betere vaardigheden leiden tot een betere uitvoering van de taken.

Het laatste deel van de literatuurstudie bespreekt enkele bestaande wiskundige modellen voor het oplossen van planningsproblemen, rekening houdend met de vaardigheden van werknemers. Hoewel deze modellen leiden tot een verbeterde prestatie van het systeem, zijn er toch tal van kritische bedenkingen. Zo kan men argumenteren dat de winsten die geboekt worden, een gevolg zijn van het meer inzetten van beter presterende werknemers. Deze werknemers presteren mogelijk op alle gebieden beter, waardoor het de vraag is of er wel sprake is van specifieke vaardigheden. Er wordt in de literatuur ook aangeraden deze werknemers meer uren in te zetten, ten koste van minder goed presterende werknemers. Dit is praktisch echter niet altijd mogelijk, bijvoorbeeld vanwege een tekort aan werkkrachten. Ook is het mogelijk dat flexwerkers geneigd zijn niet beschikbaar te blijven wanneer ze langere tijd geen werk toegewezen krijgen. Verder wordt er weinig tot geen rekening met gedragsmatige variabelen, zoals motivatie en persoonlijke kenmerken, gehouden. Men kan dus de hypothese stellen dat het resultaat niet voortvloeit uit beter ontwikkelde vaardigheden, wel uit andere kenmerken van de best presterende werknemers, zoals motivatie of een betere uithouding. Ook kan verveling opduiken wanneer een werknemer steeds dezelfde taken moet uitvoeren.

Daarbij heeft onderzoek aangetoond dat alhoewel bepaalde zaken — zoals de relaties tussen individuele prestaties en het leren/vergeten van vaardigheden, het stellen van doelen en vermoeidheid — zeker wiskundig beschreven kunnen worden, er ook hier zeker beperkingen zijn. Daarbij zijn andere factoren, gelinkt aan individuele prestaties, zoals beloningen, groepsdruk en feedback, niet exact genoeg gedefinieerd om op een wiskundige manier voor te stellen.

Het empirisch onderdeel tracht een unieke bijdrage aan de literatuur te bieden door enkele factoren die doorgaans genegeerd worden in bestaande modellen, wel te implementeren in een wiskundig model. Het planningsprobleem dat het opgestelde model oplost, is dat van taaktoewijzing. Concreet wordt de output van een model met een willekeurige toewijzing als basisversie gebruikt. Daarna wordt een optimale taaktoewijzing berekend, rekening houdend met de vaardigheden van de werknemers. Vervolgens worden factoren zoals leereffecten, motivatie en vermoeidheid geïmplementeerd. Tot slot wordt jobrotatie toegepast om een optimale output te bekomen, rekening houdend met deze factoren. Dit vanwege de dalende marginale output wanneer de negatieve effecten van vermoeidheid en gedaalde motivatie op de output, de positieve leereffecten overstijgen. De vaardigheidsniveaus die dienen als input data werden enerzijds willekeurig bepaald, anderzijds zo opgesteld om extreme situaties voor te stellen. Een voorbeeld hiervan is een situatie waarin alle werknemers uitblinken in dezelfde taak of een situatie waarin één werknemer uitblinkt in alle taken.

Door de taaktoewijzing te optimaliseren aan de hand van de vaardigheden van werknemers neemt de totale output toe met om en bij de 12%. De gemiddelde toename door rotatie bedraagt iets meer dan 8%.

De conclusie van het empirisch deel en bijgevolg deze masterscriptie is dan ook dat het implementeren van menselijke factoren — meer specifiek vaardigheden — in planningsmodellen kan leiden tot een betere prestatie. Niet enkel de output van het systeem zal toenemen, ook de totale leereffecten en het welzijn van de werknemers worden positief beïnvloed. De voornaamste beperkingen van dit onderzoek zijn het negeren van effecten door vergeten en het ontbreken van accurate gegevens voor factoren zoals vermoeidheid en motivatie.

INHOUDSOPGAVE

WOORD VOORAF	1
SAMENVATTING	2
INHOUDSOPGAVE	5
1 INLEIDING	7
1.1 <i>Probleemstelling</i>	7
1.1.1 Praktijkrelevantie van het onderwerp.....	7
1.1.2 Centrale onderzoeksvraag en ondersteunende deelvragen	8
1.2 <i>Methodologie</i>	9
1.2.1 Literatuurstudie	9
1.2.2 Opstellen van wiskundige modellen	11
2 LITERATUURSTUDIE	12
2.1 <i>Algemene context orderpicken</i>	12
2.2 <i>Planningsproblemen</i>	13
2.2.1 Niveaus van planningsproblemen	13
2.2.2 Bespreking van concrete planningsproblemen.....	14
2.3 <i>Prestatie van planningsmodellen</i>	18
2.4 <i>Assumpties omtrent planningsmodellen</i>	19
2.5 <i>Inleiding begrip ergonomics</i>	21
2.6 <i>Menselijke factoren: categorieën</i>	23
2.6.1 Fysieke factoren	23
2.6.2 Mentale factoren	24
2.6.3 Perceptuele factoren.....	26
2.6.4 Psychosociale factoren	27
2.6.5 Vaardigheden.....	29
2.7 <i>De concepten leren, vergeten en vermoeidheid</i>	33
2.8 <i>Voorbeelden van vaardigheden uit de literatuur</i>	34
2.9 <i>Jobrotatie</i>	36

2.10 Wiskundige modellen voor planningsproblemen	38
2.11 Kritische bedenkingen omtrent de bestaande wiskundige modellen.....	43
2.12 Conclusie literatuurdeel	45
3 EMPIRISCH ONDERZOEK.....	47
3.1 Introductie model.....	47
3.2 Algemene kenmerken van het model.....	47
3.3 Het model	50
3.3.1 Basisversie Willekeurig (BaWi).....	52
3.3.2 Basisversie Optimaal (BaOp).....	53
3.3.3 Realistische versie Willekeurig (ReWi) en Realistische versie Optimaal (ReOp)	57
3.3.4 Ideale versie.....	62
3.4 Bespreking resultaten niet willekeurig opgestelde inputmatrices.	65
3.4.1 Inputmatrix 6	66
3.4.2 Inputmatrix 7	66
3.4.3 Inputmatrix 8	67
3.4.4 Inputmatrix 9	67
3.4.5 Inputmatrix 10	68
3.5 Algemene bespreking resultaten.....	69
4 CONCLUSIE.....	72
4.1 Bijdrage voor de academische literatuur	72
4.2 Bijdrage voor de praktijk	73
4.3 Beperkingen van het onderzoek en aanbevelingen voor verder onderzoek.....	73
5 LITERATUURLIJST	74
6 BIJLAGEN.....	84
6.1 Bijlage 1	84
6.2 Bijlage 2	84
6.3 Bijlage 3	86
6.4 Bijlage 4.....	86

1 INLEIDING

Het eerste hoofdstuk van deze masterproef bestaat uit twee subhoofdstukken, namelijk de probleemstelling en de methodologie.

1.1 Probleemstelling

Het subhoofdstuk probleemstelling behandelt twee delen, namelijk een beschrijving van de praktijkrelevantie van het onderwerp (sectie 1.1) en een formulering van de centrale onderzoeksvraag en ondersteunende deelvragen (sectie 1.2).

1.1.1 Praktijkrelevantie van het onderwerp

In 2020 hebben zeven op tien Belgen een online aankoop verricht, dat blijkt uit een onderzoek uitgevoerd door Comeos (Comeos, 2020). Ook in de rest van Europa zien we gelijkaardige cijfers, 70% van de Europese internetgebruikers deed in 2020 een online aankoop (Eurostat, 2022). Op wereldwijd vlak was e-commerce goed voor 17,8% van alle retail verkopen in datzelfde jaar, voor 2025 liggen de verwachtingen op 25% (Statista, 2022). Met de groei van e-commerce, verkorte productlevenscycli en nieuwe concepten zoals "*Vandaag Bezorgd*" van Bol.com en zelfs "*2-hour delivery*" van Amazon Prime, neemt het belang van efficiënte logistieke processen steeds toe. Het toenemende gebruiksgemak van e-commerce leidt daarbovenop ook nog eens tot de trend om steeds vaker, in kleinere hoeveelheden te bestellen (Gong & De Koster, 2008). Het gepersonaliseerde leveringsproces, met voorkeuren zoals bepaalde tijdstippen van levering, belasten het systeem enkel meer (Holland, 2019). Aangezien de processen binnen magazijnbeheer een directe invloed hebben op de levertijd van producten is het belangrijk dat er daar een hoog niveau van efficiëntie wordt nagestreefd (Matusiak et al., 2017).

Eén van de meest arbeids-, tijds- en kapitaalintensieve activiteiten binnen magazijnbeheer is het orderpicken - het proces waarbij een magazijnmedewerker een lijst van producten uit het magazijn haalt en verzamelt voor verzending of intern gebruik. Dit proces is verantwoordelijk voor meer dan 50% van de bedrijfskosten van een magazijn (Tompkins et al., 2010). Experts op het gebied van magazijnbeheer stellen de processen omtrent het orderpicken dan ook als de hoogste prioriteit voor efficiëntieverbeteringen (de Koster et al., 2007).

Ondanks de opkomst van automatische processen voor orderpicken zijn volgens Michel (2016) slechts 3% van de magazijnen volledig geautomatiseerd en maken minder dan 10% van de magazijnen gebruik van *parts-to-picker* systemen. Dat bedrijven deze manuele processen voor orderpicken blijven verkiezen, ondanks de technologische ontwikkelingen omtrent automatisering, is toe te wijzen aan de flexibiliteit van mensen. Zij reageren beter op onverwachte veranderingen dan geautomatiseerde systemen (Grosse et al., 2015). De meeste bedrijven zouden het behouden van manueel werk ook goedkoper vinden dan automatisatie (Kadir et al., 2019).

Ten gevolge van de voorkeur voor manuele processen zijn deze uitgebreid onderzocht in de literatuur. Het meeste onderzoek focust op het reduceren van de reistijd en afgelegde afstand van orderpickers door het optimaliseren van onder andere de routes, locatietoewijzing en order *batching* methodes. De onderlinge relaties tussen deze zogenaamde 'planningsproblemen' worden echter vaak niet mee in rekening genomen (Van Gils et al., 2018). Daarbij negeren de meeste planningsmodellen met als doel het ondersteunen van managementbeslissingen de specifieke karakteristieken van werknemers. Dit leidt tot onrealistische planningen en suboptimale werkschema's. Om een hoge productiviteit en efficiëntie te waarborgen is het noodzakelijk menselijke factoren in acht te nemen. Voorbeelden hiervan zijn volgens Grosse et al. (2017) het vermogen om te leren en te vergeten, het vermogen van fysieke belasting, lichaamshouding, etc. Ondanks dat recent onderzoek deze menselijke factoren opneemt in wiskundige modellen, is er nog steeds een grote kloof tussen de literatuur en de werkelijkheid (Sgarbossa et al., 2020).

Boudreau et al. uitten in 2003 al kritiek op de literatuur omtrent operationeel management voor het negeren van menselijke factoren en het vereenvoudigen en veralgemenen van de modellen. Volgende assumpties worden volgens dat onderzoek vaak onterecht gemaakt: i) werknemers zijn geen belangrijke factor, ii) taaktijden zijn deterministisch, iii) werkers zijn homogeen, iv) afwezigheid en pauzes komen niet voor, v) effecten van leren, vergeten en vermoeidheid worden genegeerd.

Enkele voordelen van het in rekening nemen van menselijke karakteristieken zijn onder andere minder blessures bij de werknemers, een vermindering van het aantal gemaakte fouten en toenemende productiviteit. Daarbij zal er ook een positief effect zijn op menselijke waarden zoals veiligheid, vermoeidheid en stress, comfort, job tevredenheid en levenskwaliteit (Grosse et al., 2017).

1.1.2 Centrale onderzoeksvraag en ondersteunende deelvragen

Zoals reeds aangehaald, houden bestaande planningsmodellen amper rekening met menselijke factoren, zoals onder andere de vaardigheden van werknemers. Het onderzoek van Matusiak et al. (2017) toont aan dat zelfs de meest recente en performante *batching* en *routing* methodes met bijna 10% kunnen verbeterd worden door de vaardigheden van werknemers in acht te nemen. De onderlinge verschillen tussen werknemers zouden gebruikt kunnen worden om een performanter *warehousing* systeem te bekomen. Hieruit vloeit de centrale onderzoeksvraag van dit onderzoek voort:

Hoe kunnen vaardigheden geïntegreerd worden in planningsmodellen voor magazijnbeheer?

Om het onderzoek op een gestructureerde wijze te voeren, zal deze centrale onderzoeksvraag beantwoord worden aan de hand van enkele ondersteunde deelvragen.

1. Wat verstaan we onder menselijke factoren?

Een belangrijk begrip in dit onderzoek is menselijke factoren, deze zullen in kaart gebracht worden om het verder onderzoek te kunnen voeren.

2. Wat is de invloed van menselijke factoren op manuele processen omtrent orderpicken?

Om rekening te kunnen houden met menselijke factoren bij het opstellen van planningsmodellen, is het noodzakelijk eerst de invloed van deze factoren te bestuderen.

3. Welke vaardigheden kunnen magazijnmedewerkers van elkaar onderscheiden?

Om rekening te houden met de vaardigheden van de werknemers bij het opstellen van planningsmodellen, is het noodzakelijk de onderscheidende kenmerken op te lijsten.

4. Welke invloed hebben deze vaardigheden op de manuele processen omtrent orderpicken?

Wanneer er specifieke vaardigheden gekend zijn die een invloed kunnen hebben op de processen omtrent orderpicken, zal onderzocht worden in welke mate en op welke wijze.

5. Hoe worden planningsmodellen voor orderpicken opgesteld?

Om de verkregen inzichten uit de voorgaande deelvragen correct te kunnen toepassen, is een verkennend onderzoek naar bestaande modellen toepasselijk.

6. Hoe kunnen verschillende kenmerken benut worden in een planningsmodel om zo tot een betere planning te leiden?

Ten slotte zal bekeken worden hoe de inzichten omtrent de verschillende vaardigheden toegepast kunnen worden om tot betere planningsmodellen te leiden.

1.2 Methodologie

Het subhoofdstuk methodologie behandelt de onderzoeks aanpak. De methodologie van dit onderzoek is een combinatie van een literatuurstudie enerzijds (sectie 2.1) en, indien de literatuur aantoont dat het integreren van vaardigheden nuttig en mogelijk is, het opstellen van (eenvoudige) wiskundige modellen om enkele verkennende analyses te doen anderzijds (sectie 2.2).

1.2.1 Literatuurstudie

Het eerste deel van deze masterproef bestaat uit een literatuurstudie. Het doel van een literatuurstudie of literatuuronderzoek is bestaande kennis te verzamelen om zo de onderzoeksvragen te beantwoorden. Bij het verzamelen van deze kennis is het belangrijk dat de bronnen betrouwbaar zijn en de studies relevant. Om dit te waarborgen zal er gebruik gemaakt worden van academische elektronische databanken zoals:

- de online bibliotheek van de UHasselt
- Google Scholar
- Web of Knowledge
- Science Direct
- EBSCOhost

Trefwoorden (en synoniemen van deze woorden) die hierbij gebruikt zullen worden zijn onder andere:

"order picking", "warehouse", "planning model", "human factor", "skills", "optimization", "ergonomics"

Om zeker geen relevante studies te missen en het aantal irrelevante *hits* te verminderen, zal er gebruik gemaakt worden van combinaties en variaties van deze termen. Bijvoorbeeld:

"orderpicking" OR "order picking" OR "order-picking"
 ("orderpicking" OR "order picking") AND "human factor" AND "skills"

Verder zal een 'snowball search' toegepast worden. Dit houdt in dat er vanuit de referenties van een relevant artikel verder gezocht zal worden. Deze methode leidt tot verwante onderzoeken die focussen op bepaalde aspecten, hetgeen leidt tot een meer compleet beeld omtrent de onderwerpen (Brings et al., 2018).

Het is vanzelfsprekend dat er via deze methoden ook bronnen gevonden zullen worden die niet aan bepaalde eisen voldoen. Eigenschappen waaraan de bronnen moeten voldoen om in de literatuurlijst opgenomen te worden, noemt men inclusiecriteria. Dit onderzoek hanteert de volgende criteria:

- De bron is betrouwbaar. De oorsprong wordt duidelijk vermeld en is een betrouwbare instelling of autoritaire auteur binnen het vakgebied. Er wordt correct gebruik gemaakt van (voldoende betrouwbare) referenties.
- Het onderzoek is recent. Dit is geen vereiste, eerder een flexibel gegeven. Hierbij dient vooral rekening gehouden te worden met de aard van het onderwerp en de snelheid van veranderingen binnen het vakgebied. Studies naar menselijk gedrag kunnen bijvoorbeeld langer relevant blijven dan studies naar nieuwe technologische technieken voor orderpicken. Natuurlijk blijft "recent" een vaag begrip, de focus zal liggen op onderzoek uit de afgelopen 10 jaar, met de voorkeur voor het meest recente.
- De literatuur is in het Engels of Nederlands geschreven.
- De bron heeft een peer-review proces doorlopen. Dit garandeert een objectieve en kwaliteitsvolle inhoud. Ook dit is geen vereiste, er wordt wel een voorkeur aan gegeven.

1.2.2 Opstellen van wiskundige modellen

Nadat de relevante literatuur omtrent het onderwerp onderzocht is zullen enkele (eenvoudige) wiskunde modellen opgesteld worden om enkele verkennende analyses te doen. Dit vormt het empirisch deel van dit onderzoek. De concrete werkwijze van het empirisch onderzoek zal verder toegelicht worden in het desbetreffende hoofdstuk. Het doel van dit deel is het opnemen van enkele factoren die in de bestaande literatuur omtrent planningsmodellen doorgaans genegeerd worden. Deze factoren zijn onder andere de vaardigheden van werknemers, leereffecten, motivatie, vermoeidheid en dergelijke.

2 LITERATUURSTUDIE

Voor de eigenlijke literatuurstudie wordt aangevat zal kort de structuur worden toegelicht. Dit hoofdstuk vat aan met het bespreken van orderpicken, om zo een duidelijk beeld te scheppen omtrent de context van dit onderzoek. Vervolgens worden de concepten planningsproblemen en planningsmodellen besproken. Hierna zal het begrip *ergonomics* ingeleid worden, gevolgd door een bespreking van de vijf categorieën van menselijke factoren. Verder worden enkele concepten die relevant zijn voor het empirisch deel van dit onderzoek en enkele bestaande planningsmodellen meer concreet toegelicht. Tot slot volgt een kritische bedenking en conclusie omtrent het literatuurdeel.

2.1 Algemene context orderpicken

Om een duidelijk antwoord te kunnen formuleren op de onderzoeksvragen, zal eerst meer context gegeven worden omtrent orderpicken. Enkele belangrijke begrippen worden uitgelegd om meer duiding te bieden.

Goederen komen doorgaans in grote volumes binnen en klanten bestellen kleinere volumes van verschillende producten. Hieruit ontstaat de nood voor het proces orderpicken. Orderpicken is het proces waarbij de juiste hoeveelheid bestelde goederen voor een reeks bestellingen worden verzameld. Een bestelling bestaat uit één of meerdere zogenoemde order lijnen, waar elke lijn een specifiek product of "*Stock Keeping Unit*" (SKU) vertegenwoordigt (De Koster et al., 2007).

Bij het verzamelen van de goederen is er een onderscheid tussen twee methodes, namelijk *parts-to-picker* en *picker-to-parts*. Bij een *parts-to-picker* situatie worden de goederen per ladingseenheid (bijvoorbeeld een bak met twintig eenheden van een bepaald artikel in) naar de orderpicker verplaatst, bijvoorbeeld door middel van een lopende band. De orderpicker neemt dan het nodige aantal, waarna de rest automatisch terug naar de opslaglocatie wordt verplaatst. Deze systemen zijn dus deels geautomatiseerd. Bij de *picker-to-parts* situatie zal de orderpicker zich naar de goederen verplaatsen. Dit kan te voet of met een specifiek voertuig zoals een heftruck. Deze methode komt het meest voor (De Koster et al., 2007).

Enkele varianten van het *picker-to parts* systeem zijn het verzamelen volgens artikel (*batch picking*) en verzamelen volgens bestelling (*discrete picking*). Bij de eerste worden meerdere bestellingen gelijktijdig verzameld. Er bestaan verschillende varianten die tussen deze twee methodes inliggen, zoals *sort-while-pick* en *pick-and-sort*. Verder zijn er nog *zoning* en *wave picking*. Bij *zoning* wordt het magazijn opgedeeld in kleine logische zones waarbinnen orderpickers werkzaam zijn. Hier kan dan weer onderscheid gemaakt worden tussen *progressive zoning* en *synchronised zoning*. Bij de eerste worden de verzamelde goederen doorgegeven van zone tot zone, bij de tweede opereren de verschillende zones in parallel. Bij *wave picking* worden bestellingen verzameld op basis van hun bestemming en simultaan verwerkt (De Koster et al., 2007).

Het voornaamste doel van het OP systeem is om factoren zoals de gemiddelde levertijd, integriteit en accuraatheid van bestellingen te maximaliseren, dit rekening houdend met beperkingen zoals

arbeid, kapitaal en machines (Goetschalckx en Ashayeri, 1989). Des te sneller een bestelling verzameld is, des te sneller het beschikbaar is voor vervoer naar de klant. De tijd die een orderpicker erover doet om een bestelling te verzamelen noemt men de (totale) orderpicktijd. Deze bestaat uit vier componenten, namelijk de voorbereidingstijd, de verplaatsingstijd, de tijd die nodig is om te zoeken naar de juiste locatie (zoektijd) en de tijd die nodig is om het artikel uit de rekken te halen (picktijd). De verplaatsingstijd beïnvloedt de totale orderpicktijd het meest (Tompkins et al. 2010).

2.2 Planningsproblemen

In de vorige sectie van dit onderzoek werden de begrippen planningsproblemen en planningsmodellen reeds kort aangehaald. Aangezien de focus van dit onderzoek ligt op het implementeren van menselijke factoren en meer specifiek de vaardigheden van werknemers in planningsmodellen om deze problemen op te lossen, zal er in dit hoofdstuk meer diepgaand op planningsproblemen worden ingegaan.

2.2.1 Niveaus van planningsproblemen

Beslissingen omtrent orderpicken worden gemaakt op verschillende niveaus. Het onderzoek van Vijayakumar et al. (2022) maakt onderscheid tussen twee niveaus, namelijk het *design level* en het *operational level*. Het *design level* slaat op beslissingen gebaseerd op doelen op lange-termijn, op het moment dat de processen ontworpen worden. Het onderzoek haalt hierbij het ontwerp van de lay-out in het magazijn en de graad van automatisatie aan als voorbeelden van dergelijke beslissingen. Deze worden verder in dit hoofdstuk meer uitgebreid toegelicht. Beslissingen op dit niveau vereisen investeringen en moeite om ze te implementeren en zijn gebaseerd op specifieke vereisten. Ze kunnen niet zomaar snel veranderd worden en moeten dus aandachtig genomen worden. In praktijk worden dergelijke beslissingen dan ook maar om de zoveel jaar gemaakt (Schmidt en Wilhelm, 2010).

Het *operational level* daarentegen slaat op beslissingen gebaseerd op doelen op korte termijn, op het moment dat het systeem operatief is. Het onderzoek van Vijayakumar et al. (2022) haalt hierbij personeelsplanning, taaktoewijzing en *routing* als voorbeelden aan. Beslissingen op dit niveau kunnen snel en frequent aangepast worden aangezien er geen grote investeringen of moeite vereist zijn. In praktijk worden beslissingen op dit niveau dan ook dagelijks of wekelijks gemaakt (Schmidt en Wilhelm., 2010).

In tegenstelling tot het onderzoek van Vijayakumar et al. (2022), maakt het onderzoek van van Gils et al. (2018) onderscheid tussen drie niveaus van beslissingen om orderpicken te organiseren, namelijk het strategisch niveau, het tactische niveau en het operationeel niveau. Het strategisch niveau slaat hier op het uitwerken van de plannen en protocollen omtrent het gebruik van de middelen met als doel het vervullen van de lange-termijn competitieve strategie. Het tactische niveau slaat op beslissingen die een impact hebben op middellange termijn. Het operationele niveau tenslotte slaat op de beslissingen omtrent de dagelijkse operaties. Deze beslissingen moeten

natuurlijk passen binnen de grenzen afgebakend door de strategische en tactische beslissingen. Het strategisch niveau komt dus grotendeels overeen met het *design level*, het operationeel niveau met het *operational level*. Het tactische niveau bevindt zich dan weer tussen deze twee. Tabel 1 is gebaseerd op de voorbeelden van specifieke planningsproblemen per niveau in het onderzoek van van Gils et al. (2018).

Tabel 1: Planningsproblemen per niveau, naar van Gils et al. (2018)		
Niveau	Termijn	Planningsproblemen
Strategisch	Lange termijn	<ul style="list-style-type: none"> - Magazijn lay-out ontwerp - Graad van automatisering - Selectie van technische hulpmiddelen
Tactisch	Middellange termijn	<ul style="list-style-type: none"> - Locatiebepaling zones - Toewijzing goederen aan zones - Toewijzing goederen aan locaties - Zone picking - Consolidatie en sorteren van bestellingen
Operationeel	Korte termijn	<ul style="list-style-type: none"> - Batching - Routing - Allocatie van de arbeidskrachten - Hoeveelheid arbeidskrachten - Taaktoewijzing

2.2.2 Bespreking van concrete planningsproblemen

De planningsproblemen uit tabel 1 worden kort besproken met het onderzoek van van Gils et al. (2018) als basis.

Ontwerp van de lay-out van het magazijn

Het ontwerp van de lay-out van het magazijn slaat op beslissingen omtrent het aantal gangen, de breedtes en lengtes van deze gangen, het gebruik van rekken of niet, het gebruik van dwarsgangen of niet, etc.

Graad van automatisering en selectie van technische hulpmiddelen

De graad van automatisering slaat op beslissingen omtrent het gebruik van technische hulpmiddelen, bijvoorbeeld de keuze tussen een *picker-to-parts* systeem waar manueel verzameld wordt of een *parts-to-picker* systeem waar de goederen automatisch tot bij de orderpicker vervoerd worden. Hierbij dient dan de keuze te worden gemaakt welke middelen precies gebruikt zullen worden, zoals bijvoorbeeld scanners, een *pick-by-voice* of een *pick-by-light* systeem.

Locatiebepaling zones

Zoning slaat op het verdelen van het magazijn in kleinere zones. Elke orderpicker opereert dan binnen een bepaalde zone. *Zoning* krijgt relatief weinig aandacht in de literatuur ten opzichte van andere planningsproblemen, ondanks de belangrijke impact op de prestaties van het OP systeem (De Koster et al., 2007). Enkele mogelijke voordelen van *zoning* zijn bijvoorbeeld minder congestie en dat orderpickers sneller bekend raken met de locaties van de goederen. Het grootste nadeel is dat de bestellingen gesplitst worden en dus geconsolideerd moeten worden alvorens ze vervoerd kunnen worden naar de klanten. Dit kan additionele kosten met zich meebrengen (Gu et al., 2007). Van Gils et al. (2018) definiëren de locatiebepaling van zones als de beslissing hoe het magazijn verdeeld kan worden in zones, meer specifiek het aantal zones, de locatie van deze zones en de vorm van deze zones. De vorm van de zone, hiermee wordt bedoeld het aantal gangen per zone en de lengte van deze gangen, kan een substantiële impact hebben op de operationele kosten. Deze impact is afhankelijk van factoren zoals de grootte van de zone en de grootte van de batches van bestellingen (Petersen, 2002).

Toewijzing goederen aan zones en aan locaties

Wanneer het magazijn wordt opgedeeld in zones, moeten de goederen aan deze zones toegewezen worden. In praktijk worden zones vaak ingedeeld op basis van de eigenschappen van de producten in het magazijn, zoals grootte, gewicht, temperatuur vereisten en veiligheidsvoorschriften (De Koster et al., 2007). Een ander voorbeeld is op basis van de vraag of rotatie. Het onderzoek van De Koster et al. (2007) beschrijft 5 frequent gebruikte methodes, namelijk: *random storage*, *closest open location storage*, *dedicated storage*, *full turnover storage* en *class-based storage*. Deze worden vanwege de lage relevantie voor dit onderzoek niet verder besproken.

Zone picking

Zone picking slaat op de methode om de bestellingen over de verschillende zones te verzamelen en te consolideren. Het onderzoek van de Koster et al., (2007) stelt dat er twee mogelijkheden zijn om dergelijke consolidatie aan te pakken. Enerzijds is er de mogelijkheid tot *progressive assembly*, anderzijds is er de mogelijkheid tot parallel of gesynchroniseerd orderpicken. Bij *progressive assembly* begint een orderpicker aan een bestelling, wanneer alle goederen uit zijn zone verzameld zijn, geeft hij deze goederen en de picklijst door aan de volgende orderpicker in een andere zone. Deze werkt dan zijn deel afgeeft de goederen en lijst op zijn beurt door tot de bestelling compleet is. De bestelling (of batch van bestellingen) gaat dus door alle zones vooraleer deze volledig is. Men gebruikt ook wel eens de naam *pick-and-pass* voor deze methode. Bij parallel gesynchroniseerd orderpicken zal een aantal orderpickers over de verschillende zones min of meer tegelijkertijd aan een bestelling beginnen. Nadien worden deze gefragmenteerde bestellingen dan geconsolideerd. Deze methode kan leiden tot een snellere picktijd in vergelijking met orderpicken zonder zones of *progressive assembly* (Gu et al., 2007).

Het onderzoek van De Koster et al. (2007) bespreekt nog een alternatief voor *progressive* zoning waarbij de zones op een meer dynamische wijze ingedeeld worden. Een voorbeeld hiervan is het *bucket-brigade* concept. Dit concept werkt als volgt: er is één rek vanwaar de producten verzameld dienen te worden. Een orderpicker begint een bestelling aan de meeste linkse kant van dit rek. Hij verzamelt een aantal producten en geeft op een gegeven ogenblik deze deels voldane bestelling door aan een volgende orderpicker. Deze werkt verder aan de bestelling en geeft deze op zijn beurt weer door totdat de laatste orderpicker helemaal rechts van het rek uitkomt. Belangrijk hierbij is het moment dat een bestelling tussen de orderpickers wordt doorgegeven. Stel dat op een bepaald moment alle orderpickers met een aparte bestelling bezig zijn en de orderpicker het dichtst bij het einde van het rek klaar is, dan wandelt deze richting de meest linkse plek. Wanneer hij een andere orderpicker tegenkomt neemt hij zijn bestelling over en begint deze verder af te werken. De orderpicker wiens bestelling net uit handen is genomen wandelt op zijn beurt richting de meest linkse locatie totdat hij een andere orderpicker tegenkomt en zo voort. Eén orderpicker begint dus met alle bestellingen. De orderpickers moeten in volgorde staan van hun respectievelijke snelheid van werken. Enkel zo kan dit systeem naar behoren presteren. Het grote voordeel van dit systeem is dat de werkbelasting vanzelf verdeeld wordt. Een verzameling van studies beschrijven de implementatie van dit systeem in distributiecentra en tonen aan dat een grotere doorvoersnelheid en een lagere nood aan management bekomen kunnen worden. Voor verdere informatie omtrent dit concept, zie onder andere Bartholdi et al. (2006) en Bartholdi et al. (2005).

Consolidatie en sorteren van goederen

Dit slaat op de werkwijze bij het sorteren na het samenvoegen van bestellingen. Hierbij worden twee methodes aangehaald, namelijk *sort-while-pick* en *pick-and-sort*. Bij de eerste zullen de goederen meteen tijdens het verzamelen gesorteerd worden. Bij de tweede zullen eerst alle goederen verzameld worden, alvorens allemaal ze allemaal gesorteerd worden.

Batching

Wanneer een bestelling groot genoeg is wordt deze doorgaans individueel verzameld. Dat wil zeggen één bestelling per tour. Hier wordt vaak naar gerefereerd als *single order picking* (De Koster et al., 2007). Een tour bestaat meestal echter uit een verzameling van doorgaans kleinere bestellingen, genaamd een batch. Deze strategie verhoogt de efficiëntie. Dit doordat de reistijd mogelijk gereduceerd wordt. Het is dan ook belangrijk om de beste groep van bestellingen te identificeren om zo een batch samen te stellen. *Batching* is een afweging tussen kosten in het magazijn en de wachttijd voor de klanten (Li et al., 2017 en De Koster et al., 2007). Enkele methodes voor het verzamelen van bestellingen in een batch zijn: *priority rule based batching*, *seed based batching*, *savings based batching* en *exact algorithm batching* (Scholz en Wäscher, 2017 en van Gils et al., 2018). Deze worden vanwege de lage relevantie voor dit onderzoek niet verder besproken.

Routing

Routing slaat op het bepalen van de route met de kortste afstand om alle goederen te verzamelen. Dit probleem wordt vaak omgezet in een *traveling salesman* probleem (Li et al., 2017). De Koster et al. (2007) beschrijft dit probleem en de gelijkenis met routing als volgt: een verkoper begint in zijn thuisstad en dient een aantal steden exact één keer te bezoeken alvorens terug naar huis te keren. Hij kent de afstand tussen elk paar steden en wil bepalen in welke volgorde hij de bezoeken dient uit te voeren om de totale afstand te minimaliseren. Een orderpicker start aan het depot (thuisstad), moet alle locaties van de goederen (steden) bezoeken alvorens terug te keren naar het depot. *Routing* problemen worden in praktijk meestal opgelost door middel van heuristieken (Scholz en Wäscher, 2017). Er is namelijk geen optimaal algoritme beschikbaar voor elke lay-out. Verder kunnen de optimale routes in praktijk onlogisch lijken waardoor de orderpickers ervan zullen afwijken (Gademann en Van de Velde, 2005). Tot slot zal een standaard optimaal algoritme geen congestie in rekening nemen binnen de gangen, waar het gebruik van heuristieken mogelijk wel tot een reductie van de congestie leidt (De Koster et al., 2007). Enkele frequent gebruikte heuristieken voor routing zijn: *traversal*, *return*, *midpoint* en *largest gap*. Deze worden vanwege de lage relevantie voor dit onderzoek niet verder besproken.

Allocatie van de arbeidskrachten en de hoeveelheid arbeidskrachten

De allocatie van de arbeidskrachten slaat op het verdelen van de beschikbare werknemers over de verschillende zones of over de verzamel en sorteer zones. De hoeveelheid arbeidskrachten slaat op het bepalen van de hoeveelheid werknemers die (dagelijks of per shift) nodig zijn om alle bestellingen te kunnen behandelen. Deze twee problemen kunnen ook samengevoegd worden onder de naam "personeelsplanning".

Taaktoewijzing

Taaktoewijzing slaat op beslissingen omtrent de volgorde waarin bestelling of batches van bestellingen verzameld dienen te worden opdat alle bestellingen binnen het tijdsvenster verwerkt worden. Verder valt ook de toewijzing van deze bestellingen of batches van bestellingen aan de gelimiteerde hoeveelheid orderpickers hieronder.

2.3 Prestatie van planningsmodellen

In de vorige sectie werden mogelijke planningsproblemen waarmee magazijnmanagers geconfronteerd worden uitgebreid besproken. Modellen om deze problemen op te lossen noemen we planningsmodellen. Om deze planningsmodellen te kunnen evalueren en optimaal te implementeren is het nodig hun prestaties te meten. De methodiek voor deze meting komt in dit hoofdstuk aan bod.

In de literatuur worden er verscheidene methodes besproken om de effecten van de planningsmodellen meetbaar te maken. Het onderzoek van van Gils et al. (2018) maakt onderscheid tussen vier categorieën: tijd, kosten, productiviteit en service (ook wel kwaliteit genoemd). Deze worden verder onderverdeeld zodat tabel 2 bekomen kan worden.

Performance indicator	Performance measurement
Tijd	- Order picking time - Te vroeg/traag zijn
Kosten	- Kost van orderpicken
Productiviteit	- Arbeid - Picking - Uitrusting
Service (kwaliteit)	- Serviceniveau

Zoals aangegeven in bovenstaande tabel bestaat de indicator tijd uit de metingen van de *order picking time* en het te vroeg/traag zijn. *Order picking time* werd al kort besproken in dit onderzoek en slaat op de doorlooptijd om een set van bestellingen te verzamelen. Te vroeg/traag zijn slaan op de verschillen tussen het tijdstip van voltooiing van een bestelling en het beoogde tijdstip. Het meet dus de mate waarin de tijdsvensters in het proces gerespecteerd worden. Dit is in het bijzonder bruikbaar om combinaties van de planningsproblemen te analyseren (van Gils et al., 2018). Eerder in dit onderzoek werden de vier componenten van de totale orderpicktijd reeds aangehaald. Verder wordt er gesteld dat de verplaatsingstijd deze het meest beïnvloedt (Tompkins et al. 2010). Het onderzoek van Van Gils et al. (2018) deelt de totale orderpicktijd op in zes componenten, namelijk de opstarttijd, de reistijd, de zoek- en picktijd, de sorteertijd, inactieve tijd en overige tijd. Inactieve tijd slaat hierbij op de onproductieve tijd, bijvoorbeeld ten gevolge van een congestie in de gangen. Overige tijd slaat dan weer op activiteiten zoals bijvoorbeeld het verplaatsen van de bestelling van de pickzone naar de sorteerzone.

De indicator kosten bestaat uit de meting van de kosten van het orderpicken. Door de verschillende componenten van de orderpicktijd te vermenigvuldigen met een vaste kost, zoals bijvoorbeeld de verplaatsingskost per tijdseenheid, worden deze berekend. Dat kan eventueel nog aangevuld worden met enkele niet-tijdsgebonden kosten zoals de kosten van de uitrusting.

De indicator productiviteit bestaat uit de metingen van arbeid, *picking* en uitrusting. Met arbeid wordt de verhouding tussen waarde toevoegende tijd en de totale tijd van het orderpicken bedoeld. Onder *picking* valt dan weer het aantal verzamelde producten per orderpicker per tijdsinterval. Ten slotte slaat uitrusting op de mate waarin de eventueel aanwezige uitrusting benut wordt.

De indicator service, ook wel kwaliteit genoemd, bestaat uit de meting van het service niveau. Dit wordt uitgedrukt in het percentage bestellingen dat binnen de vooropgestelde tijd afgewerkt wordt.

Het onderzoek van Vijayakumar et al. (2022) maakt onderscheid tussen drie belangrijke maatstaven, deze zijn productiviteit, kwaliteit en welzijn. Productiviteit beslaat de benodigde tijd en kosten om de activiteiten uit te voeren. Zo kan een minder ervaren werknemer een negatieve invloed hebben op de prestatie aangezien hij langer nodig kan hebben om een bepaald product te zoeken en te identificeren (Grosse en Glock., 2013). Productiviteit omvat dus de categorieën tijd, kosten en productiviteit zoals besproken in Van Gils et al. (2018). De maatstaf kwaliteit wordt bepaald door de hoeveelheid fouten die gemaakt worden tijdens het uitvoeren van de activiteiten. Bij orderpicken kunnen er bijvoorbeeld foute goederen verzameld worden van de verkeerde locatie vanwege de complexe methodes die toegepast worden (Burinskiene, 2010). Deze maatstaf komt overeen met de categorie service zoals besproken in van Gils et al. (2018). Aanvullend op de vier categorieën zoals eerder in deze sectie overlopen, bespreekt het onderzoek van Vijayakumar et al. (2022) nog de maatstaf welzijn. Welzijn omvat onder andere de gezondheid van werknemers. Zieke of geblesseerde werknemers kunnen hoge kosten met zich meebrengen vanwege een gedaalde productiviteit. Het welzijn van een werknemer kan ook afhangen van de werkomstandigheden, bijvoorbeeld de mate van repetitieve taken, fysiek uitputtend werk of het gebruik van ergonomische tools. Hier zal nog verder op ingegaan worden later in dit onderzoek (onder andere sectie 2.6.4).

We kunnen concluderen dat het onderzoek van van Gils et al. (2018) voornamelijk focust op economische aspecten, waar het onderzoek van Vijayakumar et al. (2022) ook het welzijn van de werknemers in acht neemt. Dit kunnen we plaatsen onder de term ergonomische factoren. Wat er met deze term precies bedoeld wordt, vormt het onderwerp van sectie 2.5.

2.4 Assumpties omtrent planningsmodellen

Zoals reeds werd aangehaald in de inleiding van dit onderzoek wordt in planningsmodellen vaak geen rekening gehouden met menselijke factoren. Modellen voor het plannen van de operaties, zowel in een logistieke als productiecontext kennen vaak de assumptie dat werknemers steeds op hetzelfde tempo, met dezelfde variantie werken. Bij het evalueren van *bottlenecks* in een systeem, wordt zelden naar menselijke karakteristieken gekeken (Boudreau et al., 2003). In contrast hiermee staan

de gedragsmodellen die gebruikt worden bij HRM. Deze focussen vaak wel op individuele capaciteiten en factoren zoals motivatie en training. De studie van Boudreau et al. uit 2003 stelt dat er veel verschillende gedragsmodellen zijn en haalt vier belangrijke elementen aan die in de meeste van deze modellen terugkomen. Deze vier elementen zijn:

- 1) Bekwaamheid: De vaardigheden, kennis en capaciteiten die nodig zijn om een taak uit te voeren.
- 2) Opportuniteit: Wanneer werknemers met situaties geconfronteerd worden waarbij acties kunnen uitgevoerd worden met het gewenste effect.
- 3) Motivatie: De drive om deze acties uit te voeren, gecreëerd door de perceptie dat deze gelinkt zijn aan gewenste resultaten en beloningen.
- 4) Begrip: Kennis over hoe een individu's acties het systeem en het halen van het beoogde doel beïnvloeden.

De volgende assumpties worden doorgaans gemaakt om menselijk gedrag eenvoudiger op te nemen in planningsmodellen (Boudreau et al., 2003):

- 1) Mensen zijn geen bepalende factor. Veel modellen bekijken machines zonder mensen, zodat de menselijke kant van het systeem volledig wegvalt.
- 2) Mensen zijn deterministisch en voorspelbaar. De modellen maken de assumptie dat werknemers niet afwezig zijn en altijd aan een constant tempo werken. Fouten gebeuren niet of gebeuren ad random. Alle werkers zijn identiek, ze werken aan dezelfde snelheid, reageren hetzelfde op beloningen, etc.
- 3) Werknemers zijn onafhankelijk, ze worden op geen enkele manier beïnvloedt door elkaar. Niet fysiek, niet psychologisch.
- 4) Werknemers zijn stationair, er wordt geen rekening gehouden met leereffecten, vermoeidheid of andere patronen.
- 5) Werknemers zijn geen deel van het aangeboden product of de dienst van het bedrijf. Werknemers ondersteunen het product door het te maken of repareren maar worden niet beschouwd als deel van de *customer experience*.
- 6) Werknemers kennen geen emoties en worden niet beïnvloed door factoren zoals trots, loyaliteit of verlegenheid.
- 7) Het uitgevoerde werk is perfect waarneembaar. Er zit geen foutmarge op de meetbaarheid. Er wordt geen rekening gehouden met een eventueel Hawthorne-effect. Dit houdt in dat werknemers anders gaan presteren aangezien ze geobserveerd worden. Dit effect is vaak positief, werknemers gaan meer presteren wanneer ze onderzocht worden.

2.5 Inleiding begrip *ergonomics*

Het beheer van magazijnen brengt veel repetitieve taken met zich mee. Deze taken kunnen resulteren in musculoskeletale aandoeningen (MSA). Dit is een verzamelnaam voor diverse problemen met de spieren, gewrichten, pezen, ligamenten en zenuwen. Doorgaans treden deze op ter hoogte van de ledematen, nek of (onder)rug. MSA zijn de meest gerapporteerde oorzaken voor afwezigheid op het werk (Schneider and Irastorza, 2010). Volgens de studie van Marras et al. (1999) waren 52% van alle werk-gerelateerde aandoeningen musculoskeetaal, goed voor een verlies van 2% van de bruto nationale producten (BNP) in de Europese Unie. Problemen met de onderrug brengen de grootste kosten met zich mee. Onderzoek van Dagenais et al. (2008) stelt dat in de Verenigde Staten, rugproblemen een jaarlijkse kost van \$12,2 miljard met zich meebrengen. Het belang van menselijke factoren neemt dan ook toe, alsook gerechtelijke initiatieven die leiden tot meer voorschriften omtrent veiligheid en welzijn in de logistiek sector (Grosse et al., 2015). Deze menselijke factoren worden ook wel eens *ergonomics* genoemd. De *International Ergonomics Association* (IEA) definieert *ergonomics* als "de wetenschappelijke discipline begaan met het begrijpen van de interacties tussen mensen en andere elementen van een systeem, en het beroep dat theorie, principes, data en designmethoden toepast om zo het welzijn van de mens en de prestaties van het systeem te verbeteren". Belangrijk is dat deze definitie aangeeft dat systemen die rekening houden met menselijke factoren dus zowel sociale als zakelijke voordelen kunnen hebben.

Desalniettemin focust het merendeel van het wetenschappelijk onderzoek omtrent dit onderwerp slecht op één van de twee aspecten. Onderzoek dat wel beide aspecten in rekening neemt heeft echter meermaals aangetoond dat de menselijke en zakelijke voordelen elkaar versterken (Sgarbossa et al., 2022). De studie van Grosse et al. (2017) levert — aan de hand van een inhoudsanalyse van 186 wetenschappelijke artikels — bewijs dat menselijke factoren vaak genegeerd worden in planningsmodellen voor orderpicken. Wanneer er te veel gevraagd wordt van de werknemers, kan dat lijden tot vermoeidheid, uitputting en eventueel blessures. Wanneer vermoeidheid opduikt kan dat een toename van gemaakte fouten en een afname van de productiviteit teweegbrengen. Ook het ervaren van pijn en blessures tijdens het werk kan tot deze gevolgen leiden (Lohaus en Habermann, 2019). Hier wordt verderop in dit hoofdstuk (o.a. sectie 2.7) nog dieper op ingegaan. Zijn de condities echter gunstig voor de werknemers, neemt de prestatie van het systeem mogelijks toe dankzij leereffecten (Givi et al., 2015). Aangezien de menselijke factoren dus zowel een positieve als negatieve invloed kunnen uitoefenen op een systeem, is het volgens Sgarbossa et al. (2022) belangrijk deze mee in rekening te nemen tijdens de ontwerpfase van deze systemen. Hieronder vallen ook de logistieke systemen waar in dit onderzoek op gefocust wordt. Verder maken nieuwe technologieën het mogelijk om grote hoeveelheden data te verzamelen en te gebruiken voor het verbeteren van systemen. Deze data-gebaseerde modellen zouden ook rekening moeten houden met menselijke aspecten, zoals vermoeidheid, werkdruk en persoonlijke eigenschappen. Ten slotte kunnen geavanceerde onderzoekstechnieken gebruikt worden om de beste methoden te vinden omtrent het plannen en controleren van logistieke systemen, gebaseerd op menselijke factoren.

Zoals eerder aangehaald, kan vermoeidheid een belangrijke rol spelen. Wat er precies met vermoeidheid bedoeld wordt, is het onderwerp van discussie. Onderzoek van Jones et al. (2015) beschrijft vermoeidheid als een gevoel van moe zijn en lichamelijk ongemak ten gevolge van een langdurige activiteit. Barker en Nussbaum (2011) halen moe zijn, een gebrek aan energie en lichamelijke inspanning aan als maatstaven van vermoeidheid. Elkosantini en Gien (2009) beschrijven vermoeidheid dan weer als een staat van verminderde capaciteit om te werken na een periode van fysieke activiteit. Het niveau van vermoeidheid dat kan optreden hangt af van zowel de werkomgeving en het type werk als van de fysieke capaciteiten van de werknemer zelf. Twee belangrijke factoren die bijdragen aan vermoeidheid binnen de werkomgeving zijn zware gewichten en oncomfortabele houdingen (Jones et al., 2014). Er zijn diverse studies omtrent de invloed van vermoeidheid op de productiviteit, hier gaan we in deze sectie niet verder op in. In hoofdstuk 2.7 van dit onderzoek zal vermoeidheid verder besproken worden. Voor meer informatie, zie: Grandjean (1979); Perez et al. (2014); Digiesi et al. (2009); Lodree et al., (2009).

Vermoeidheid lijkt dus vooral op de fysieke capaciteiten van de werknemer te slaan. Maar natuurlijk zijn er ook andere kenmerken die werknemers onderscheiden. In de literatuur omtrent orderpicken komen vooral de volgende vier categorieën van menselijke factoren aan bod: fysieke, mentale, perceptuele en psychosociale. Dit kan, zoals in de inleiding reeds werd aangehaald, aangevuld worden met een vijfde categorie, namelijk de vaardigheden van werknemers. Deze categorie vormt de focus van dit onderzoek. In de volgende sectie worden deze vijf categorieën meer concreet besproken.

2.6 Menselijke factoren: categorieën

Zoals reeds enkele keren werd aangehaald in deze paper kan de integratie van menselijke factoren in planningsmodellen deze modellen realistischer maken. De gedragingen en individuele kenmerken van een werknemer hebben een invloed op de uitkomst van het manuele proces omtrent orderpicken (Grosse et al., 2015). Natuurlijk is het belangrijk om te weten welke factoren dat precies zijn, om deze zo goed mogelijk te implementeren in de planningsmodellen. We focussen dus op de menselijke factoren die van belang kunnen zijn bij manueel orderpicken.

Het meeste onderzoek, waaronder dat van Grosse et al. (2015) onderscheidt vier categorieën van menselijke factoren, namelijk: fysieke, mentale, perceptuele en psychosociale. Het onderzoek van Vijayakumar et al. (2022) biedt een overzicht van studies omtrent het integreren van menselijke factoren binnen een logistieke context en maakt onderscheid op basis van dezelfde vier eerdergenoemde menselijke factoren.

2.6.1 Fysieke factoren

Bij het manuele orderpicken worden er fysieke taken uitgevoerd zoals het verplaatsen tussen de rekken, het heffen en tillen van goederen, bukken en uitrekken, etc. Deze fysiek uitdagende taken kunnen leiden tot onder andere vermoeidheid en andere ergonomische risico's, zoals MSA, reeds toegelicht in het vorig hoofdstuk (Grosse et al., 2015). Wanneer een orderpicker zich door het magazijn verplaatst, bijvoorbeeld te voet met een kar die geduwd wordt, hebben de fysieke capaciteiten en grenzen van de werknemer een grote invloed op de snelheid en kwaliteit waarmee deze taak uitgevoerd kan worden. Factoren zoals onder andere het gewicht van de goederen en het materiaal dat gebruikt wordt om deze te vervoeren kunnen het risico op MSA beïnvloeden (Abe et al., 2018 en Al-Easawi et al., 1999). Alhoewel de fysieke taken binnen het orderpicken dus een invloed kunnen hebben op de gezondheid van de werknemers, wordt er doorgaans geen rekening mee gehouden in de literatuur, al zijn er enkele uitzonderingen (Grosse et al., 2015). Zo houden verschillende onderzoeken rekening met de capaciteit van een orderpicker of het gebruikt materieel bij het *batchen* van goederen. Dit is echter vaak gebaseerd op het aantal goederen, niet op het gewicht van deze artikelen (Kulak et al., 2012). Sadiq et al. ontwierpen in 1996 al een methode om zwaardere goederen toe te wijzen aan locaties die ergonomisch gezien gunstiger zijn. Petersen et al. (2005) definieerde wat zij noemen de "gouden zone", dit zijn locaties die hoger liggen dan het middel van de orderpicker, maar lager dan de schouders. Vanwege een tijdsbesparing bij het verzamelen van goederen op deze hoogte, raadt het onderzoek aan om goederen die meer frequent besteld worden binnen deze zone te op te slaan.

Het onderzoek van Grosse et al. (2015) stelt voor dat er verder onderzoek gevoerd dient te worden naar modellen die het discomfort van de werknemers, ten gevolge van herhaaldelijk bukken of zware lasten, minimaliseren. Hiervoor wordt verwezen naar een onderzoek van Finnsgård et al. uit 2011, dat verschillende hoogtes van locaties een ergonomische classificatie toewijst. Verder kan de

verpakking van de goederen aangepast worden, bijvoorbeeld met handvaten, om zo het tillen makkelijker te maken (Davis & Marras., 2000). Tot slot zouden modellen realistischer gemaakt kunnen worden door de picktijd aan te passen aan onder andere het gewicht van de goederen of de positie van de goederen in het rek. Nog diepgaander zouden factoren zoals vermoeidheid gemodelleerd kunnen worden als een stijgende factor in functie van de totale belasting (Grosse et al., 2015).

2.6.2 Mentale factoren

Onder het mentale aspect vallen de cognitieve vaardigheden van een werknemer, alsook het vermogen om te leren en de mate waarin de werknemer zaken vergeet. Vanwege het repetitieve karakter van de taken binnen het orderpicken kunnen leereffecten een significante invloed hebben. Zoals eerder aangehaald dient hierdoor een afweging gemaakt te worden tussen een flexibel magazijn, frequent aangepast om de reistijden te reduceren en een magazijn dat langer hetzelfde blijft zodat de werknemers de locaties beter kennen (Vijayakumar et al., 2022). Het onderzoek van Grosse et al. (2015) stelt dat na verloop van tijd een werknemer kennis vergaart over het magazijn en de benodigde picktijd dusdanig een leercurve volgt. Elementen waarop dit van toepassing is, zijn volgens het onderzoek onder andere de lay-out van het magazijn, de kortste route, locaties van goederen, verificatie van de goederen, alsook het zoeken in de rekken. Dit onderzoek stelt ten slotte nog dat het vermogen om te leren (en daarbij horend te vergeten) slechts zelden in OP modellen wordt opgenomen.

Dat leereffecten de picktijd kan verminderen werd empirisch gevalideerd in de studie van Grosse & Glock uit 2013. Deze studie onderzocht de leereffecten volgens zes leercurves, deze worden hieronder kort besproken:

1. De *Wright* leercurve

Dit is een van de meest frequent gebruikte leercurves, vanwege zijn eenvoudige structuur en het feit dat dat deze curve meermaals gevalideerd is in de praktijk.

2. De *De Jong* leercurve

Dit is een uitbreiding van de *Wright* curve, deze curve houdt rekening met de zogenoemde "*incompressibility*" van het proces. Daarmee wordt de verhouding tussen manuele en geautomatiseerde delen van het proces bedoeld. Dit wordt uitgedrukt als een constante tussen nul en één, waarbij nul slaat op een volledig manuele operatie en één op een volledig geautomatiseerde operatie (Badiru, 2012).

3. De *Stanford B* leercurve

Dit is een uitbreiding van de *Wright* curve, deze curve houdt rekening met de voorgaande ervaring en kennis van een individu.

4. De *tijdconstante* leercurve

Deze leercurve modelleert een toename in de output over de tijd, vanwege een leereffect.

5. Het drie-parameters hyperbolisch model

Dit model wordt omschreven als een flexibel en makkelijk toe te passen leercurve. Verder is dit model in staat om individuele leereffecten van conceptuele en motorische vaardigheden te beschrijven.

6. De *duale fase* leercurve

Deze leercurve maakt onderscheid tussen twee types van menselijk leren, namelijk cognitief en motorisch leren. Cognitief leren slaat op de kennis om een taak correct uit te voeren en komt vooral voor in het begin van het leerproces. In de context van dit onderzoek slaat dit bijvoorbeeld op de kennis van de productlocaties en de kortste routes naar deze locaties. Motorisch leren slaat op de kennis om een fysieke taak correct uit te voeren. Meer concreet wordt hiermee het leren van een specifieke subklasse van vaardigheden bedoeld. Hieronder vallen verschillende motorische bewegingen die accuraat en snel uitgevoerd kunnen worden, naarmate deze herhaaldelijk werd uitgevoerd. Dit komt vooral voor bij eenvoudige taken of later in het leerproces (Bera et al., 2021).

Het onderzoek concludeert dat men de assumptie mag maken dat de prestaties van orderpickers toenemen naarmate het aantal voltooide opdrachten stijgt. Dit onder invloed van onder andere een reductie van de benodigde tijd om producten te identificeren of een reductie van het aantal incorrect verzamelde producten. Concreet vond de studie een *learning rate* tussen 85,72 en 97,67 procent. Een *learning rate* van 85 procent houdt in dat een orderpicker zijn prestaties na 30 bestellingen al zou kunnen verdubbelen. Bij een *rate* van 97,57 procent vindt een verdubbeling van de prestaties pas plaats na $7,1 \cdot 10^8$ bestellingen. Gemiddeld werd een *rate* van 93,09 procent waargenomen, hetgeen zou betekenen dat er na 732 bestellingen een verdubbeling van de prestaties plaatsvindt. Natuurlijk heeft deze studie tal van implicaties en beperkingen, maar het is een mooie illustratie van de toch wel significante invloed die leereffecten kunnen hebben op de productiviteit van de werknemers. In de volgende sectie (sectie 2.7) van dit onderzoek zal er verder op de effecten van zowel leren als vergeten en hun invloed op de productiviteit ingegaan worden.

De relatie tussen de vertrouwdheid met een magazijn van de werknemers en de zoektijd is het onderwerp van tal van studies. Enkele hiervan zijn het onderzoek van Chuang et al. (2012) en van van Zelst et al. (2009). Ten slotte is ook de relatie tussen de complexiteit van de routes en de prestatie van de orderpickers onderwerp van enkele studies, zoals die van Petersen en Aase (2004) en Gademann en Velde (2005). Deze laatste studie maakt de interessante opmerking dat werknemers mogelijk afwijken van een vastgelegde route wanneer ze deze zelf onlogisch vinden.

Het mentale kan ook een invloed hebben op de gezondheid van de werknemers. Zo kunnen werknemers hun houding verbeteren als ze goed herinneren hoe een handeling correct uitgevoerd dient te worden of door leereffecten. Hierbij dient vermeld te worden dat een studie van Winstein et

al. (1996) wel aantoonde dat training nog steeds de houding van werknemers sneller beïnvloedt dan voorgenoemde factoren.

Het onderzoek van Grosse et al. (2015) stelt dat voor het mentale aspect verder onderzoek gevoerd kan worden naar de manier waarop de toewijzing van producten aan locaties de leereffecten kunnen beïnvloeden. Aanvullend kunnen er nieuwe protocollen ontwikkeld worden voor *routing* die minder afhankelijk zijn van de werknemers hun vermogen om te onthouden, zonder deze werknemers te vervelen of te demotiveren. In de reeds bestaande planningsmodellen zouden factoren zoals leercurves opgenomen kunnen worden. Hier dient dan de afweging gemaakt te worden tussen een kortere zoektijd en een lager gebruik van de beschikbare ruimte vanwege vaste locaties. Ook het verlies van de leereffecten na verandering van de manier van werken dient in rekening genomen te worden. Verder haalt de studie nog de personeelsstructuur van de onderneming aan. De verhouding tussen tijdelijke werknemers (met weinig ervaring en dus leereffecten) en permanente werknemers (met meer ervaring en dus leereffecten) kan namelijk de prestaties van het OP systeem beïnvloeden. Tot slot kan ook de afweging tussen routes die makkelijker te onthouden of logischer zijn en routes die optimaal zijn vanuit een theoretisch operationeel standpunt, bekeken worden. Een studie die hierop ingaat is die van Brynzér en Johansson uit 1996, hier wordt in dit onderzoek niet verder op ingegaan.

2.6.3 Perceptuele factoren

Het perceptuele aspect reflecteert hoe een werknemer bepaalde zaken waarneemt. Dit kan gaan om visuele, auditieve of tactiele waarneming, dus waarneming door zicht, gehoor of aanraking. Waarneming door smaak of reuk zijn minder relevant in een OP context en worden dan ook niet mee in rekening genomen. Een concreet voorbeeld van de invloed van het perceptuele aspect is het gebruik van technologieën zoals *pick-by-light* en *augmented reality*, waarbij de werknemers extra prikkels krijgen met als doel het ontvangen van informatie efficiënter te laten verlopen (Vijayakumar et al., 2022).

De snelheid waarmee informatie wordt verwerkt, ook wel het informatieverwerkingsproces genoemd, beïnvloedt de totale picktijd. Daarnaast speelt ook het aantal gemaakte fouten een belangrijke rol bij het verbeteren van een OP proces. Hierbij kan bijvoorbeeld het design, de inhoud en de lay-out van een picklijst een rol spelen. Ook dit valt onder de perceptuele factor, daar er sprake is van waarneming en de verwerking van informatie (Grosse et al., 2015). Het onderzoek van Weaver et al. (2010) speelt in op dit aspect, door gebruik te maken van picklijsten met een grafische weergave van de rekken en gemarkeerde hoeveelheden die verzameld dienen te worden. Deze empirische studie toont aan dat de orderpickers minder tijd nodig hadden om bepaalde goederen te identificeren, hetgeen dus bijdroeg aan een kortere totale picktijd. Verder zijn er studies over de effecten van onder andere kleur, positie, etc. van productinformatie op de snelheid van herkenning en perceptie door werknemers en als gevolg daarvan op de zoektijd (Bishu et al., 1992). Het onderzoek van Grosse et al. (2015) vermeldt nog tal van studies omtrent picklijsten maar daar wordt in deze studie niet verder op ingegaan.

Er is geen bewijs terug te vinden in de literatuur dat aantoonde dat perceptuele factoren de gezondheid van werknemers kunnen beïnvloeden in een OP context. Onderzoek van Aarås et al. (2001) toont aan dat licht en optometrie cruciale factoren zijn voor de gezondheid van werknemers in een kantoorruimte. Dit kan eventueel uitgebreid worden naar een OP context. Het onderzoek van Grosse et al. (2015) stelt tenslotte nog dat bij slechte visuele condities werknemers eventueel een oncomfortabele houding gaan aannemen om bepaalde informatie te kunnen waarnemen, hetgeen kan leiden tot klachten zoals nek- en ruggpijn op lange termijn.

Voor wat betreft het perceptuele aspect kan verder onderzoek gevoerd worden naar methoden om het aantal gemaakte fouten te reduceren. Bijvoorbeeld door te investeren in papierloze technologieën zoals *pick-by-light* en *pick-by-voice*. De kosten van zo een systeem dienen dan afgewogen te worden ten opzichte van de toegenomen efficiënte ten gevolge van een gereduceerd aantal fouten (Grosse et al., 2015). In de planningsmodellen kan er met het perceptueel aspect rekening gehouden worden door bijvoorbeeld goederen die op elkaar lijken geen aanliggende locaties toe te wijzen.

2.6.4 Psychosociale factoren

Het psychosociale aspect is relevant voor alle taken in een OP context en kan een significante invloed hebben op zowel de prestaties, de kwaliteit en de gezondheid van de werknemers (Grosse et al., 2015). De studie van Vijayakumar et al. (2022) stelt dat het psychosociale aspect de impact van motivatie, feedback, beloningen, stress, verveling, tevredenheid over het werk, tijdsdruk en persoonlijke condities van de werknemer reflecteert. De studie van Grosse et al. (2015) vermeldt in overeenstemming motivatie, stress/werkdruk en verveling, maar vermeldt nergens feedback, beloningen, tevredenheid, tijdsdruk en persoonlijke condities. Wel worden aanvullend op het onderzoek van Vijayakumar et al. (2022) nog de personeelsstructuur en taaktoewijzing genoemd als onderdelen van het psychosociale aspect. Deze vijf onderdelen, genoemd in de studie van Grosse et al. (2015) worden kort besproken:

Motivatie

Motivatie beïnvloedt de prestaties van werknemers en is onderhevig aan het gebruik van beloningen, feedback, werktevredenheid en nieuwe uitdagingen. Ook de hoeveelheid rust kan een bepalende factor zijn van de mate waarin een werknemer gemotiveerd is (Lodree et al., 2009). Deze factoren hebben doorgaans een positieve invloed op de motivatie.

Stress en werkdruk

De prestaties en gezondheid van werknemers zijn onderhevig aan stress, vermoeidheid en de werkdruk (Lodree et al., 2009). Op vermoeidheid werd reeds eerder in dit onderzoek uitgebreider ingegaan, dus dit wordt in dit deel niet verder besproken. In magazijnen draagt vooral de tijdsdruk bij aan stress en algemene werkdruk. Verder spelen ook factoren zoals hygiëne, geluid, temperatuur en lichtinval mee (De Koster et al., 2011).

Verveling

Er werd slechts één relevante studie teruggevonden die de invloed van verveling bij werknemers onderzoekt in deze context. Dit onderzoek van Azizi et al. (2010) stelt dat er een positieve correlatie is tussen de prestaties bij het uitvoeren van repetitieve taken en verveling. Een methode om dit tegen te gaan is jobrotatie, dat in sectie 2.9 van dit onderzoek meer uitgebreid aan bod komt. Aangezien het repetitief uitvoeren van taken wel mogelijk bijdraagt aan de prestaties door middel van leereffecten, dient de afweging gemaakt te worden tussen deze voordelen en de nadelen van verveling.

Personeelsstructuur en taaktoewijzing

HRM-strategieën zoals personeelsstructuur en taaktoewijzing kunnen een invloed hebben op het psychosociaal aspect. Dit wordt in dit deel niet verder besproken aangezien dit te ver afdwaalt van de focus van dit onderzoek. Voor meer informatie, zie de studies waarnaar verwezen wordt in Grosse et al. (2015). De eventueel praktische implicaties die wel relevant zijn zullen besproken worden in het empirisch deel van dit onderzoek.

Bijkomend onderzoek omtrent het psychosociale aspect kan gevoerd worden naar de invloed op kwetsuren, productiviteit en kwaliteit. Planningsmodellen kunnen psychosociale factoren in rekening nemen door onder andere kosten van nieuwe technologieën (zoals bijvoorbeeld een digitale persoonlijke assistent) af te wegen ten opzichte van de voordelen door de mogelijks toenemende motivatie (Grosse et al., 2015). Het onderzoek van Grosse et al. (2015) verwijst verder ook naar het onderzoek van Azizi et al. (2010) om de positieve effecten van jobrotatie aan te halen. Zoals eerder reeds werd aangehaald kan jobrotatie namelijk verveling tegengaan in een productieve context, hetgeen het interessant maakt dit ook voor een logistieke context te bekijken. Tot slot is het belangrijk te vermelden dat studies die bepaalde menselijke factoren in rekening nemen, maar andere negeren, mogelijk beïnvloed worden door deze uitgesloten factoren.

2.6.5 Vaardigheden

Zoals reeds werd aangehaald in het hoofdstuk omtrent het begrip *ergonomics* behandelt het merendeel van de literatuur enkel de vier voorgaande categorieën van menselijke factoren, namelijk de fysieke, mentale, perceptuele en psychosociale factoren. Onder andere het onderzoek van Rinaldi et al. (2022) vermeldt echter nog een vijfde categorie, namelijk de vaardigheden ("*skills*") van de werknemers. De auteurs stellen dat sinds vele jaren, onderzoekers problemen omtrent personeelsplanning en jobrotatie trachten op te lossen door het balanceren van de fysieke belasting en de ergonomische risico's waaraan werknemers blootgesteld worden. Hierbij werden werknemers echter altijd als identiek beschouwd aangaande hun vaardigheden, efficiëntie en kwalificatie. De vaardigheden van de werknemers beïnvloeden de prestatie van productiesystemen thans significant. Ander onderzoek dat vaardigheden vermeld is onder andere dat van Hong (2019) en Matusiak et al. (2017). Dit is zeker niet volledige lijst, verder in dit onderzoek (sectie 2.10) zullen er meer studies besproken worden.

Het concept "vaardigheden" is niet eenvoudig en kort te definiëren. De invulling van het begrip hangt vaak af van de context en er zijn veel verschillen terug te vinden in de literatuur. In het volgend deel zal aan de hand van enkele relevante studies getracht worden een kader op te stellen omtrent "vaardigheden", om zo meer duidelijkheid te scheppen, aangaande de invulling in een OP context.

Een definitie voor vaardigheden in een bredere context wordt gegeven aan de hand van het onderzoek van Green uit 2011. Deze studie tracht het concept "vaardigheden" te definiëren op een manier die wetenschappelijk is, gericht op menselijke, sociale en economische aspecten. Daarbovenop stelt de auteur dat het concept relevant moet zijn voor een socio-economische discussie in de 21^e eeuw. De auteur definieert vaardigheden als een persoonlijke kwaliteit met drie belangrijke eigenschappen:

1. Productief: het gebruik van de vaardigheden levert waarde op.
2. Uitbreidbaar: vaardigheden worden verbeterd door training en ontwikkeling.
3. Sociaal: vaardigheden zijn sociaal bepaald.

Een eenvoudige definitie, gebaseerd op het onderzoek van Green (2011) is terug te vinden in het onderzoek van Kotzab et al. uit 2018. Dit onderzoek definieert vaardigheden (in het Verenigd Koninkrijk als context) als het vermogen van een persoon om een taak uit te voeren. De auteurs halen wel aan dat het concept in andere landen een andere betekenis kan dragen. Zo verstaat men in Duitsland onder vaardigheden "de kennis die nodig is om een breder segment van activiteiten uit te voeren". Verder wordt er verwezen naar een onderzoek van Payne uit 2000 dat aantoont dat het begrip "vaardigheden" is geëvolueerd van "het technische vermogen gebruikt bij ambachten" tot een multidimensionaal begrip bestaand uit persoonlijke karakteristieken, gedragingen en attitudes. Tot slot stelt het onderzoek dat vaardigheden opgedeeld kunnen worden in verschillende domeinen, waaronder de volgende:

- Algemene vaardigheden: dit slaat op vaardigheden die gebruikt worden bij het uitvoeren van taken die bij een breed gamma aan beroepen voorkomen. Een concreet voorbeeld hiervan zijn algemene IT-vaardigheden.
- Specifieke vaardigheden: dit zijn vaardigheden die gebruikt worden bij het uitvoeren van taken die slechts bij één of enkele beroepen voorkomen. Deze vaardigheden kunnen niet beschreven worden met algemene indicatoren. Een concreet voorbeeld hiervan is de vaardigheid om een *forecast* oftewel voorspelling/planning te maken.
- Cognitieve vaardigheden: dit zijn vaardigheden die gebruikt worden bij taken waarbij er veel moet nagedacht worden. Voorbeelden hiervan zijn lezen, schrijven of probleemoplossend denken.
- Interactieve vaardigheden: dit zijn vaardigheden die gebruikt worden bij taken waar communicatie en samenwerking met anderen nodig zijn.
- Fysieke vaardigheden: dit zijn vaardigheden die gebruikt worden bij taken waar bijvoorbeeld behendigheid, kracht of uithouding voor nodig is.

Let erop dat dit slechts de domeinen zijn die worden aangehaald in het onderzoek van Kotzab et al. (2018) en dus zeker niet alle mogelijke domeinen om vaardigheden te classificeren. Vaardigheden kunnen in meerdere domeinen geclassificeerd worden. Buiten deze domeinen kunnen vaardigheden ook ingedeeld worden op basis van de complexiteit. Hierbij zijn basisvaardigheden de minimale cognitieve vereisten die nodig zijn voor verkrijgen van eender welke job en het aanleren van nieuwe vaardigheden. Deze minimumgrens is natuurlijk moeilijk te definiëren en hier is dan ook weinig literatuur over terug te vinden. Onderzoek heeft wel het belang van deze basisvaardigheden op de arbeidsmarkt aangetoond (McIntosh en Vignoles, 2001). Waar basisvaardigheden de minst complexe vaardigheden zijn, staat aan de andere kant van de schaal het begrip "talent". Het onderzoek van Green (2011) stelt dat "talent" slechts zelden duidelijk gedefinieerd wordt door zij die het begrip gebruiken, maar dat het doorgaans gebruikt wordt voor mensen met een uitzonderlijk goed ontwikkelde vaardigheid. Het karakteriseert de kwaliteiten nodig voor het leiden van de grote private en publieke instellingen, of om de top te bereiken op artistiek of sportief gebied. Dit wijkt af van de context van dit onderzoek, maar "talent" kan dus gebruikt worden voor het omschrijven van vaardigheden, ontwikkeld op een niveau dat significant hoger ligt dan gemiddeld genomen bij werknemers in dezelfde context.

Verder haalt het onderzoek van Green (2011) het belang aan van een goede match tussen de vereiste vaardigheden, nodig voor het correct uitvoeren van een taak, en de vaardigheden van de werknemer. Eén voorbeeld van een slechte match is "onderbenutting", dit treedt op wanneer een werknemer zijn werk-gerelateerde vaardigheden niet of te weinig gebruikt. Dit is verwant aan "overscholing", waarbij iemand een diploma of opleiding heeft dat hoger ligt dan het benodigde niveau voor de job. Hiernaar wordt ook wel gerefereerd als werken "onder je niveau". Een ander voorbeeld van een slechte match is wanneer er een kloof optreedt tussen de werknemers competenties en de benodigde competenties, waarbij die van de werknemer niet voldoen. Dit komt minder vaak voor wanneer de werkgever de mogelijkheden heeft om werknemers op te leiden of te ontslaan wanneer ze niet voldoen aan de gevraagde capaciteiten (Jensen & Kletzer, 2010).

Een laatste belangrijke opmerking uit het onderzoek van Green (2011) is dat het vereiste niveau van vaardigheden geen absolute standaard kent, maar wordt bepaald door gelijkaardige organisaties en economieën. Dit is de reden dat beleidsmakers en adviseurs een sterke interesse hebben in het interregionaal en internationaal vergelijken van vaardigheden. Hierbij dient te worden vermeld dat het direct meten van vaardigheden zeldzaam is, waardoor onderzoekers doorgaans prestaties op het vlak van educatie gebruiken om de vergelijking te maken, hetgeen niet hetzelfde is.

Het onderzoek van Rinaldi et al. uit 2022 stelt dat vaardigheden slaan op de mogelijkheid voor een werknemer om een taak uit te voeren, inclusief de cognitieve, fysieke en organisatorische vermogens, en in het algemeen elk persoonlijk element dat kan bijdragen tot de prestaties van een werknemer. Voor deze definitie baseerde de auteurs zich op een studie van Grugulis en Stoyanova uit 2011. Bijkomende elementen uit deze studie zullen verder in dit onderzoek aangehaald worden (sectie 2.10).

Het onderzoek van Matusiak et al. uit 2017 bespreekt het verschil tussen capaciteiten (*capabilities*) en vaardigheden (*skills*). De auteurs definiëren capaciteiten als het vermogen om een bepaalde taak uit te voeren, onafhankelijk van de benodigde tijd. Vaardigheden worden gedefinieerd als de snelheid waarop zo een taken uitgevoerd kunnen worden.

Het onderzoek van Grugulis & Stoyanova uit 2011 stelt dat zowel vaardigheden als prestaties moeilijk te definiëren, evalueren en meten zijn. De auteurs verklaren dat "vaardigheden" een aantal dimensies kent, waaronder persoonlijke expertise, educatie, cognitieve capaciteiten, competentie en ervaring. Het onderzoek bespreekt verder drie aspecten van vaardigheden, relevant voor academisch onderzoek, namelijk: vaardigheden op het werk, *soft skills* en vaardigheden in een sociale context. Vaardigheden op het werk slaan op de structurele elementen die discretie vragen of beperken, de toegekende of onthouden verantwoordelijkheden, de verscheidenheid aan taken die worden uitgevoerd, de bevoegdheid om te bepalen wanneer taken naar tevredenheid zijn voltooid en het vermogen om prioriteiten te stellen (Grugulis & Stoyanova, 2011). *Soft skills* slaat op een divers en uitgebreid gamma aan kwaliteiten, hetgeen het verleidelijk maakt er te veel of te weinig aan toe te wijzen. Deze categorie kan namelijk onder andere glimlachen, probleemoplossend denken en zelfvertrouwen bevatten. Aangezien dit aspect eerder gebaseerd is op wat werkgevers willen dan op theoretisch onderzoek, is het moeilijk een rationele basis te definiëren. Daarbij vermelden de auteurs dat de vraag gesteld moet worden of deze waarden, attitudes en kwaliteit wel effectief vaardigheden zijn. Als voorbeeld verwijzen ze naar de trend waar bovengemiddeld aantrekkelijke mensen meer verdienen (Biddle & Hamermesh, 1998). Dit betekent nog niet dat uiterlijk een vaardigheid is (Grugulis & Stoyanova, 2011). Tot slot vermelden de auteurs dat de uitbreiding van het begrip "vaardigheid" op talrijk academisch protest stoot en dat het integreren van *soft skills* en sociale vaardigheden kan resulteren in een definitie die zo uitgebreid is dat hij betekenisloos wordt. Gegeven de diversiteit van *soft skills* en de inaccurate meetmethoden, concluderen de auteurs dat: "ondanks het belang van *soft skills*, hun bijdrage aan de prestaties op de werkvloer onmogelijk te bepalen is" (Grugulis & Stoyanova, 2011). In dit onderzoek zal dan ook niet verder ingegaan worden op *soft skills*.

Het onderzoek van Larco Martinelli uit 2010 stelt dat er veel betekenissen zijn voor het begrip "vaardigheid" (*skill*) oftewel "vermogen" (*ability*). De auteur definieert het niveau van vaardigheid (*skill level*) als de maximale productieve capaciteit van een individu voor een gegeven taak, die gedurende een gegeven periode volgehouden kan worden. Het niveau van een vaardigheid is dus afhankelijk van de taak en is een reflectie van de mentale en psychosociale capaciteiten van een werknemer, gebruikt om die taak uit te voeren. Verschillende jobs vragen om verschillende mentale en psychosociale capaciteiten. Het niveau van vaardigheid is dus de samengestelde maximumcapaciteit om een bepaalde taak uit te voeren.

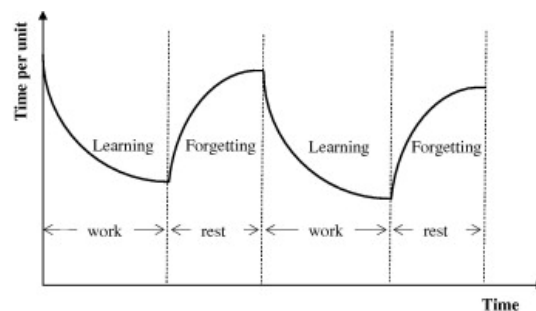
Zoals in het begin van dit deel reeds werd aangehaald, is er dus geen duidelijke standaarddefinitie. Voor dit onderzoek baseren we ons op de volgende aandachtspunten:

- Een vaardigheid is het vermogen een taak uit te voeren.
- Vaardigheden kunnen worden verbeterd.
- Beter ontwikkelde vaardigheden leiden tot een betere uitvoering van de taken.

2.7 De concepten leren, vergeten en vermoeidheid

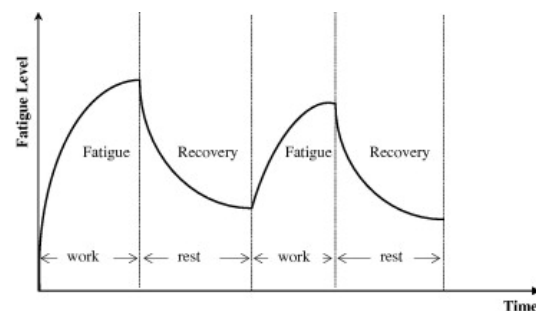
In sectie 2.6.2 van dit onderzoek werd het concept van leereffecten al kort aangehaald en werden verschillende leercurves besproken. Gezien het belang van zowel leren als vergeten voor het empirisch deel van dit onderzoek zal er in deze sectie verder op beide concepten en vooral hun onderlinge verhouding ingegaan worden. Daarbij wordt ook vermoeidheid — en de relatie met leren en vergeten — besproken, ook dit concept komt terug in het empirisch deel van dit onderzoek.

Het onderzoek van Jaber et al. (2013) bespreekt de relatie tussen leren en vergeten en implementeert vermoeidheid en herstel in dit concept. De auteurs stellen dat de huidige modellen omtrent leren en vergeten geen rekening houden met de fysieke belasting die het uitvoeren van een taak voortbrengt. Vergeten wordt gedefinieerd als het verlies van kennis, enerzijds door het niet uitvoeren van een bepaalde taak gedurende een tijd, anderzijds door het doorheen halen van bepaalde kennis en vaardigheden. Onderzoek heeft aangetoond dat de mate waarin werknemers vergeten afhangt van de duur van een pauze. De auteurs stellen het effect van vergeten op de productiviteit voor als een spiegeling van de leereffecten, hetgeen visueel wordt voorgesteld in figuur 1.



Figuur 1: Leren en vergeten doorheen de tijd (naar Jaber et al., 2013)

De relatie tussen vermoeidheid en herstel wordt gelijkaardig voorgesteld, hetgeen visueel wordt weergegeven in figuur 2.



Figuur 2: Vermoeidheid en herstel doorheen de tijd (naar Jaber et al., 2013)

Tot slot stellen de auteurs dat het implementeren van leren/vergeten en vermoeidheid/herstel in een planningsmodel kan leiden tot betere prestaties van het model (Jaber et al., 2013).

2.8 Voorbeelden van vaardigheden uit de literatuur

In het vorige deel werden verschillende definities van "vaardigheden" besproken en vergeleken. In dit deel zal er ingegaan worden op specifieke en concrete vaardigheden, die vermeld worden in wetenschappelijke literatuur. De focus ligt hierbij op een logistieke context, waar mogelijk voor het OP proces.

De eerste concrete voorbeelden van vaardigheden komen uit een studie omtrent het PIAAC (*Programme for the International Assessment of Adult Competencies*), vrij vertaald "het programma voor de internationale beoordeling van competenties voor volwassenen". Dat is een grootschalig internationaal onderzoek dat het niveau en het gebruik van vaardigheden onder 16- tot 65- jarigen in kaart brengt (Buisman et al., 2013). Dit onderzoek, ontwikkeld door de OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) of in het Nederlands de OESO (De Organisatie voor Economische Samenwerking en Ontwikkeling), levert internationaal vergelijkbare data omtrent de vaardigheden van volwassenen in 24 landen. PIAAC is ontwikkeld om een maatstaf te bieden omtrent de kernvaardigheden, dat zijn essentiële vaardigheden, nodig voor het begrijpen, analyseren en gebruiken van informatie in zowel het dagelijks leven als op het werk. Het onderzoek omvat onder andere de beoordeling van cognitieve vaardigheden op drie domeinen: taalvaardigheid, rekenvaardigheid en het probleemoplossend vermogen. Deze beoordeling gebeurde op basis van realistische taken die uitgevoerd moesten worden, zoals het invullen van een logboek of het reserveren van een vergaderruimte op een bepaalde datum (Hanushek et al., 2015).

Concreet worden de domeinen omschreven als volgt (Hanushek et al., 2015):

Taalvaardigheid

Het vermogen om geschreven teksten te begrijpen, te evalueren, te gebruiken en ermee aan de slag te gaan, met als doel deel te nemen aan de maatschappij, persoonlijke doelen te bereiken en nieuwe kennis en potentieel te ontwikkelen.

Rekenvaardigheid

Het vermogen om wiskundige informatie en ideeën te raadplegen, te gebruiken, te interpreteren en te communiceren, met als doel aan een breed gamma van wiskundige noden te kunnen voldoen.

Probleemoplossend vermogen (in technologische omgevingen)

Het vermogen om digitale technologie, communicatie tools en netwerken te gebruiken, met als doel het verkrijgen en evalueren van informatie, met andere te communiceren en praktische taken uit te voeren.

In het onderzoek van Norman et al. (2002) wordt de verdeling van arbeiders bij productie in cellen, rekening houdend met hun technische en menselijke vaardigheden, onderzocht. In deze studie worden onder andere het opstarten, bedienen en controleren van machines, data invoer en

wiskundige vaardigheden als technische vaardigheden genoemd. Bij de voorbeelden van menselijke vaardigheden komen communicatie, probleemoplossend denken, omgaan met conflicten, het vermogen om beslissingen te nemen, leiderschap en risico inschatting genoemd. Warner et al. (1997) maakt gebruik van een gelijkaardige onderverdeling, namelijk op basis van mechanische en menselijke vaardigheden. Onder mechanische vaardigheden vallen wiskundige vaardigheden en het vermogen om metingen uit te voeren. Voorbeelden van menselijke vaardigheden die genoemd worden zijn communicatieve vaardigheden, leiderschap, teamwerk en het vermogen beslissingen te nemen.

Voorbeelden in een OP context zijn terug te vinden in het onderzoek van Matusiak et al. uit 2017. Deze studie omtrent het optimaliseren van *batching*, door rekening te houden met de individuele vaardigheden van pickers in een magazijn, richt zich op vijf specifieke vaardigheden. Deze vaardigheden worden kort besproken:

- Wendbaarheid: het vermogen om op- en af te stappen van een (hef)truck. Dit wordt in het model gemodelleerd door het aantal picklijnen, dus het aantal verschillende goederen dat verzameld dient te worden.
- Rijvaardigheid: hoe goed iemand met een (hef)truck kan rijden. Dit wordt in het model gemodelleerd door de totale af te leggen afstand.
- Kracht: het vermogen om zware goederen op te tillen. Dit wordt in het model gemodelleerd door de totale massa van de te verzamelen goederen.
- Het vermogen om op lage of grote hoogte goederen te verzamelen, mogelijks beïnvloed door de lengte van de picker. Dit wordt in het model gemodelleerd door de gemiddelde hoogte van de locaties waar goederen verzamelen moeten worden.
- Het vermogen om batches met grote volumes te picken. Dit wordt in het model gemodelleerd door het totale volume van de batch.

2.9 Jobrotatie

Een methode om risico's in verband met ergonomische problemen te reduceren die in tal van onderzoeken besproken wordt, is jobrotatie. Aangezien het concept van jobrotatie toegepast wordt in enkele planningsmodellen die in de volgende sectie van dit onderzoek aan bod komen, wordt er in dit deel meer diepgaand op het concept ingegaan.

Jobrotatie behoort tot een groep van organisatorische strategieën die trachten de blootstelling van werknemers aan ergonomische risico's te verminderen, doormiddel van het introduceren van variatie in de taken die uitgevoerd dienen te worden (Diego-Mas, 2020). In bijvoorbeeld een productie context wisselen dan de werknemers regelmatig van werkplek en bijhorende taak. Jobrotatie kan voordelig zijn voor zowel de werknemers als het bedrijf. Zo zullen de werknemers mogelijks minder snel verveeld geraken, zal hun tevredenheid toenemen en zal stress afnemen. Daarbij neemt hun bereik aan vaardigheden toe. Jobrotatie kan wel nefast zijn voor de leereffecten zoals eerder besproken bij de mentale factoren, daar de werknemers minder lang dezelfde taken uitvoeren. Hier dient dus de afweging gemaakt te worden tussen de voor- en nadelen. Ten slotte is er ook bewijs terug te vinden dat jobrotatie vermoeidheid en fysieke stress kan verminderen, met als resultaat minder werk-gerelateerde MSA in de studies van Rissén et al. (2002), Johnsson (1998) en Schneider et al. (1997). Voor het bedrijf bestaan de voordelen van jobrotatie uit het verminderd aantal MSA en daarbij horende afwezigheid van de werknemers. Ook kunnen werkgevers hun werknemers zo beter leren kennen, aangezien ze hen een uitgebreider gamma aan taken zien uitvoeren. Zo kunnen dus ook de vaardigheden van de werknemers beter geobserveerd worden (Jeon & Jeong, 2016). De studie van Diego-Mas (2020) stelt dat het risico waaraan een werknemer wordt blootgesteld afhankelijk is van drie factoren, namelijk de grootte van het risico, de tijd dat de werknemer is blootgesteld en de frequentie. Een voorbeeld om dit te verduidelijken is een werknemer die op een ladder een taak moet uitvoeren. Hoe minder stabiel de ladder, hoe groter de kans dat de werknemer valt (grootte van het risico). Staat hij er langer op, neemt de kans ook toe (tijd). Moet de werknemer dagelijks op een ladder werken in plaats van bijvoorbeeld wekelijks, zal de kans op een ongeluk ook toenemen (frequentie). Jobrotatie kan inspelen op deze laatste twee factoren. De grootte van het risico van bepaalde taken zal niet afnemen, maar doordat de werknemers meer taken uitvoeren, kunnen er taken toegevoegd worden met een minder groot risico. De duur en frequentie van de taken met een groter risico nemen dus af. Ook risico's die voortvloeien uit verveling, herhaaldelijke bewegingen of voortdurende slechte houdingen kunnen gereduceerd worden. Hierbij dient vermeld te worden dat het onderzoek van Diego-Mas verwijst naar zowel studies die de positieve effecten van jobrotatie aantonen, als naar studies die negatieve effecten op langere termijn aantonen (zie Kujier et al., 2005).

Het onderzoek van Boenzi et al. uit 2015 bespreekt jobrotatie in een productieomgeving, met de focus op oudere werknemers. Wanneer de leeftijd van werknemers toeneemt, kan er namelijk een leeftijd gerelateerde afname van de productiviteit zijn. Dit vanwege de verminderde fysieke en cognitieve capaciteiten. De studie bespreekt jobrotatie als techniek om het ergonomisch risico te reduceren, de werknemers een breder gamma aan vaardigheden aan te leren en dusdanig de

productiviteit te vergroten. Verder bespreekt de studie het gebrek aan planningsmodellen die rekening houden met menselijke factoren, hetgeen relevant is voor dit onderzoek. Zo zouden ergonomische evaluaties en de verdeling van de taken traditioneel onafhankelijk worden uitgevoerd, er wordt dus geen rekening gehouden met ergonomische factoren bij de taakverdeling.

2.10 Wiskundige modellen voor planningsproblemen

Er zijn diverse studies die gebruik maken van wiskundige modellen waarin menselijke factoren zoals vaardigheden, motivatie en ergonomische factoren opgenomen worden. Het doel van deze modellen kan variëren, zo zijn er bijvoorbeeld modellen die de verdeling van werknemers over bepaalde taken trachten te verbeteren, maar ook modellen die de benodigde tijd om batches van meerdere bestellingen te verwerken, trachten te minimaliseren. Het onderzoek van Juran & Schruben uit 2004 bespreekt de aanpak om zo een model op te stellen. Dit voor systemen waarbij de prestaties van de werknemers een significante invloed hebben op de productiviteit. Als voorbeeld halen de auteurs hoogtechnologische industrieën en de dienstensector aan. Deze sectoren rekenen doorgaans op relatief weinig, maar goed opgeleide/ontwikkelde werknemers (Juran & Schruben., 2004). Hoewel de logistieke sector en het manuele OP proces hier niet meteen onder vallen, biedt het onderzoek een aanpak die mogelijk ook op deze sector toepasbaar is.

In dit deel zullen de relevante bestaande modellen, rekening houdend met vaardigheden, bondig besproken en vergeleken worden. Voor een meer diepgaande blik op de gebruikte modellen, algoritmes en parameters kunnen best de vermelde onderzoeken geraadpleegd worden.

Er werden 12 onderzoeken teruggevonden die een model bevatten dat rekening houdt met de vaardigheden van werknemers. Uitzondering hierop is het model uit het onderzoek van Corominas et al. (2010), dat niet spreekt van vaardigheden maar van ervaring. Het begrip ervaring voldoet echter aan de richtlijnen voor vaardigheden zoals eerder in dit onderzoek beschreven (sectie 2.6.5). Het concrete planningsprobleem dat het model tracht op te lossen, de context van het onderzoek en de manier waarop vaardigheden gedefinieerd of in rekening gebracht worden is weergegeven in tabel 3 (weergegeven op de volgende twee pagina's).

Tabel 3: Besproken literatuur omtrent planningsmodellen

Auteurs en jaar	Besproken planningsprobleem	Context van het onderzoek	Methode implementatie vaardigheden
Norman et al. 2002	Taaktoewijzing	Productie	<ul style="list-style-type: none"> • Vier vaardigheidsniveaus • Vaardigheidsniveau beïnvloedt de kwaliteit • Werknemers kunnen een niveau stijgen door training • Minimaal niveau nodig voor bepaalde taken
McDonald et al. 2009	Taaktoewijzing	Productie	<ul style="list-style-type: none"> • Onbepaald aantal niveaus van vaardigheid • Werknemers kunnen in niveau stijgen door training • Vaardigheidsniveau beïnvloedt de productiviteit • Minimaal niveau nodig voor bepaalde taken
Cordeau et al. 2010	Taaktoewijzing	Telecommunicatie (techniekers)	<ul style="list-style-type: none"> • Onbepaald aantal niveaus van vaardigheid • Minimaal niveau nodig voor bepaalde taken • Vaardigheidsniveau beïnvloedt de productiviteit <u>niet</u> • Vaardigheidsniveau zelf verandert niet
Corominas et al. 2010	Taaktoewijzing	Niet vermeld	<ul style="list-style-type: none"> • Factor ervaring, deze neemt toe door het uitvoeren van taken en beïnvloedt de productiviteit voor alle taken
Othman et al. 2012	Taaktoewijzing	Productie	<ul style="list-style-type: none"> • Onbepaald aantal niveaus van vaardigheid • Werknemers kunnen in niveau stijgen door training • Vaardigheidsniveau beïnvloedt de productiviteit <u>niet</u> • Minimaal niveau nodig voor bepaalde taken
Grosse et al. 2013	Toewijzing van locaties	OP	<ul style="list-style-type: none"> • Onbepaald aantal niveaus van vaardigheid • Vaardigheidsniveau beïnvloedt de leereffecten en de picktijd • Vaardigheidsniveau zelf verandert niet

Tabel 3: Besproken literatuur omtrent planningsmodellen (vervolg)

Auteurs en jaar	Besproken planningsprobleem	Context van het onderzoek	Methode implementatie vaardigheden
Boenzi et al. 2015	Taaktoewijzing	Repetitieve taken (productie)	<ul style="list-style-type: none"> • Vaardigheidsniveau afhankelijk van de leeftijd van werknemers • Vaardigheidsniveau beïnvloedt de productiviteit • Vaardigheidsniveau zelf verandert niet
Mossa et al. 2016	Taaktoewijzing	Productie	<ul style="list-style-type: none"> • Drie niveaus van vaardigheid • Vaardigheidsniveau beïnvloedt de productiviteit • Vaardigheidsniveau zelf verandert niet
Matusiak et al. 2017	Batching	OP	<ul style="list-style-type: none"> • Onderzoek naar welke vaardigheden de werknemers bezitten aan de hand van data • Onderzoek naar hoe deze ingezet kunnen worden
Bakshi et al. 2020	Taaktoewijzing	Productie	<ul style="list-style-type: none"> • Onbepaald aantal niveaus van vaardigheid • Vaardigheidsniveau beïnvloedt de kost in termen van werkdruk voor het uitvoeren van een taak • Vaardigheidsniveau zelf verandert niet
Mou, 2022	Taaktoewijzing	OP	<ul style="list-style-type: none"> • Kennis van het magazijn beïnvloedt de zoektijd (kan gezien worden als een vaardigheid)
Rinaldi et al. 2022	Taaktoewijzing	Productie	<ul style="list-style-type: none"> • Coëfficiënt die rekening houdt met het vaardigheidsniveau en de vorige taak die uitgevoerd werd • Deze coëfficiënt beïnvloedt de benodigde tijd om een taak uit te voeren

In eerste instantie valt het op dat op twee studies na al het onderzoek gericht is op taaktoewijzing. Dit is waarschijnlijk te wijten aan de grote invloed van individuele eigenschappen van werknemers op deze beslissingen. Het onderzoek van Matusiak et al. (2017), dat focust op het *batchen* van bestellingen, verschilt van het ander onderzoek in die zin dat de het doel van het onderzoek eerst het achterhalen van de vaardigheden van werknemers is. In het ander onderzoek is het vaardigheidsniveau telkens gegeven. Dit onderzoek wordt verder in deze sectie dan ook meer uitgebreid behandeld.

In vijf van de onderzoeken kan het vaardigheidsniveau van een werknemer niet veranderen. Dit is tegenstrijdig met de definitie van vaardigheden die in dit onderzoek gebruikt wordt, de focus ligt dan ook vooral op het overig onderzoek. In drie van de studies kan het vaardigheidsniveau enkel toenemen door middel van training en treden er dus geen natuurlijke leereffecten op.

In vier van de onderzoeken is er een bepaald vaardigheidsniveau nodig om bepaalde taken uit te voeren, in het overig onderzoek is elke werknemer in staat om elke taak uit te voeren.

In vijf van de onderzoeken beïnvloedt het vaardigheidsniveau de productiviteit van een werknemer voor een bepaalde taak. In één onderzoek beïnvloedt het vaardigheidsniveau de kwaliteit en in één onderzoek de leereffecten en de picktijd. In twee studies geldt het vaardigheidsniveau puur als drempel voor het al dan niet in staat zijn een taak uit te voeren.

Het doel van de modellen varieert, zo focust het onderzoek van Norman et al. (2002) puur op het maximaliseren van de winst. Het onderzoek van McDonald et al. (2009) heeft als enige doel het minimaliseren van de totale kosten van het systeem. In tegenstelling tot deze twee houdt onder andere het model van Rinaldi et al. (2022) rekening met zowel ergonomische factoren als de prestaties van de werknemers. Het model van Othman et al. (2012) heeft zelfs vier doelen, namelijk: het minimaliseren van de totale kosten, het minimaliseren van ontslagen bij de best presterende werknemers, het minimaliseren van inactieve tijd bij de werknemers en het minimaliseren van de graad van vermoeidheid.

De conclusie van het onderzoek van Rinaldi et al. uit 2022 is dat de prestaties van het systeem op korte termijn kunnen afnemen, om zo een ergonomisch betere verdeling van het uit te voeren werk te bekomen.

Verder wordt er aangetoond dat er lange-termijn voordelen zullen optreden, vanwege de verbeterde ergonomische omstandigheden. Dit zal leiden tot een verbeterd welzijn van de werknemers en zal uiteindelijk bijdragen aan een betere algemene prestatie van het systeem. De afweging tussen de nadelen op korte termijn en de voordelen op lange termijn moet dus gemaakt worden. Hierbij wordt vermeld dat een gelimiteerde afname van de prestaties toelaat om een meer gepaste werklast te bekomen, op vlak van tijd dat men bezig is taken uit te voeren. De auteurs hopen dat dit op lange termijn zal leiden tot een stijging in de prestaties van de werknemers (Rinaldi et al., 2022).

Zoals eerder in deze sectie werd aangehaald zal het onderzoek van Matusiak et al. uit 2017 meer diepgaand besproken worden. Dit onderzoek situeert zich in een logistieke context en focust op het *batchen* van bestellingen. Door rekening te houden met de verschillen in vaardigheden tussen orderpickers, stelden de auteurs een verbetering van bijna 10% vast ten opzichte van de bestaande methoden, dit op de totale verwerkingstijd van een bestelling. Voor dit onderzoek werd data gebruikt van een Finse retailer, dat vanuit één groot magazijn alle winkels en *e-commerce* klanten bevoorraadt. De data werd uit logboeken met een tijdstempel gehaald en gebruikt om modellen te bouwen die de nodige tijd om een batch volledig te verzamelen voorspellen. De auteurs stellen dat ondanks alle werknemers van de retailer getraind zijn, ze verschillende fysieke en mentale vaardigheden hebben. Zo zijn sommigen beter in het hanteren van zware massa's of het stapelen van producten in een kar. Het effect van deze factoren wordt uit de data onttrokken en gebruikt om de voorspellende modellen op te stellen aan de hand van een multilevel model. Deze voorspellingen kunnen dan gebruikt worden om te bepalen welke bestellingen best samengevoegd worden in een batch en welke werknemers deze batch het beste toegewezen krijgen. De resultaten kunnen gebruikt worden door managers om de verschillende vaardigheden van werknemers te analyseren. Vervolgens zouden zo de verschillende bestellingen beter verdeeld kunnen worden of in het geval van flexwerkers, de beste kandidaten geselecteerd worden (Matusiak et al., 2017).

De benodigde tijd om een batch van bestellingen te verzamelen is afhankelijk van meerdere factoren, zoals de specifieke kenmerken van de goederen die moeten verzameld worden (bijvoorbeeld de locaties, het gewicht, het aantal verschillende goederen, etc.), maar ook van gedragskenmerken zoals intrinsieke en extrinsieke motivatie (Larco Martinelli, 2010). Deze factoren worden niet expliciet opgenomen in het model, wel impliciet door enkel historische data omtrent de prestaties van elke werknemer te gebruiken. Deze data kan worden teruggevonden in de WMS (*Warehouse Management System*) data (Matusiak et al., 2017).

De conclusie van het onderzoek van Matusiak et al. uit 2017 is dat, gezien de significante invloeden van de vaardigheden op de totale benodigde tijd, managers best rekening houden met de verschillende vaardigheden van werknemers.

2.11 Kritische bedenkingen omtrent de bestaande wiskundige modellen

Ondanks de vaak significante verbeteringen in de prestaties van modellen door het mee in rekening nemen van vaardigheden, zijn er toch enkele kritische opmerkingen. Onderzoek heeft alvast aangetoond dat beter ontwikkelde vaardigheden niet per definitie leiden tot een hogere productiviteit. Werknemers zijn mogelijk niet voldoende gemotiveerd om inspanningen te leveren tot de grenzen van hun kunnen (Bendoly & Prietula, 2008). Het is dus aangeraden om bij modellen waar men rekening houdt met variërende niveaus van vaardigheden en externe aspecten die de motivatie kunnen beïnvloeden, niet ervan uit te gaan dat hogere niveaus van vaardigheden automatisch leiden tot een hogere prestatie. Het is beter het niveau van de vaardigheden te zien als een bovengrens voor de mogelijke prestaties (Larco Martinelli, 2010).

Men kan argumenteren dat de winsten die bij het onderzoek van Matusiak et al. (2017) geboekt worden, een gevolg zijn van het meer inzetten van beter presterende werknemers. Deze werknemers presteren mogelijks op alle gebieden beter, waardoor het de vraag is of er wel sprake is van specifieke vaardigheden. De auteurs raden ook aan deze werknemers meer uren in te zetten, ten koste van minder goed presterende werknemers. Dit is praktisch echter niet altijd mogelijk, bijvoorbeeld vanwege een tekort aan werkkrachten. Ook is het mogelijk dat flexwerkers niet geneigd zijn beschikbaar te blijven wanneer ze langere tijd geen werk toegewezen krijgen. Het meer inzetten van beter presterende werknemers wordt ook toegepast in het onderzoek van Rinaldi et al. (2022). Hierbij wordt de opmerking gemaakt dat dit niet optimaal is wanneer men ergonomische factoren zoals vermoeidheid in acht neemt. Verder stelt het onderzoek van Azizi et al. uit 2010 dat vaardigheden kunnen afnemen wanneer ze voor bepaalde tijd niet gebruikt worden. Dit kan het geval zijn bij de reeds minder presterende werknemers die minder taken toegewezen krijgen. In dat geval moeten de kosten voor training mee in rekening genomen worden (Azizi et al., 2010). Ook kan verveling opduiken wanneer een werknemer steeds dezelfde taken moet uitvoeren. Dit wordt aangehaald in onder andere het onderzoek van Allwood & Lee (2004). Ten slotte suggereert onderzoek van Mossa et al. (2016) dat het trainen van werknemers voor meerdere taken, hetgeen hun flexibiliteit verhoogt, kan leiden tot betere prestaties qua zowel productiviteit als ergonomische doeleinden.

Norman et al. (2002) stellen een veel grotere verbetering vast van het systeem wanneer er slechts aan bepaalde werknemers training gegeven wordt, in tegenstelling tot training aan alle werknemers. Het ongelijk behandelen van de werknemers kan echter nefast zijn voor de motivatie en onrechtstreeks dus bijdragen aan verminderde prestaties op lange termijn. Algemeen houdt het meeste onderzoek geen rekening met gedragsmatige variabelen, zoals motivatie en persoonlijke kenmerken. Men kan dus de hypothese stellen dat het resultaat niet voortvloeit uit beter ontwikkelde vaardigheden, wel uit andere kenmerken van de best presterende werknemers, zoals motivatie of een betere uithouding. Dit zou natuurlijk verder onderzocht moeten worden.

Onderzoek heeft ook aangetoond dat alhoewel de relaties tussen individuele prestaties en het leren/vergeten van vaardigheden, het stellen van doelen en vermoeidheid zeker wiskundig

beschreven kunnen worden, er zeker beperkingen zijn. Daarbij zijn andere factoren, gelinkt aan individuele prestaties, zoals beloningen, groepsdruk en feedback, niet voldoende afgetekend om op een wiskundige manier voor te stellen (Larco Martinelli, 2010).

Het onderzoek van Rinaldi et al. (2022) focust op een werkplaats waar vijf taken uitgevoerd worden, met als reden dat deze taken arbeidsintensief zijn en goed ontwikkelde vaardigheden nodig zijn. De prestatie van het systeem is dus in grote mate onderhevig aan de prestaties van de werknemers (Rinaldi et al., 2022). Het valt te discussiëren of dit het geval is voor een OP proces. Voor het manueel verzamelen van bestellingen uit rekken is misschien niet zoveel kennis en kunde nodig als voor het herstellen van een autoband, zoals in de studie als voorbeeld gebruikt wordt.

Verder is het belangrijk rekening te houden met de mogelijke controversialiteit die kan optreden wanneer men bepaalde eigenschappen gaat koppelen aan demografische factoren zoals leeftijd, gender of IQ en deze eigenschappen op hun beurt weer aan prestaties (Baines et al., 2005). Dit is het geval in het onderzoek van Boenzi et al. (2015).

Algemeen gezien vermelden de bestaande modellen die in dit onderzoek besproken worden geen specifieke vaardigheden (op het onderzoek van Matusiak et al.) na. Ook hier is het dan belangrijk de bedenking te maken of het wel duidelijk te onderscheiden vaardigheden zijn die meespelen, of gewoon bepaalde specifieke taken waarin men beter is dankzij andere factoren. Wanneer men wel vaardigheden kan onderscheiden, of op zijn minst een idee heeft waarom een bepaalde werknemer uitblinkt in een bepaalde taak, kan dit wel gebruikt worden om te voorspellen in welke taken deze werknemer nog bovengemiddeld zal presteren. Indien deze onderscheiding niet mogelijk is, kan zo een voorspelling echter moeilijk of zelfs onmogelijk worden.

2.12 Conclusie literatuurdeel

Bij het maken van beslissingen aangaande de processen omtrent orderpicken worden menselijke factoren vaak niet mee in rekening genomen. Onderzoek wijst thans uit dat deze processen beter kunnen presteren indien factoren zoals persoonlijke kenmerken, ergonomie en vaardigheden wel mee in rekening worden genomen. In dit onderzoek worden vijf categorieën van menselijke factoren, die in de literatuur terugkomen, besproken. Deze zijn: fysieke factoren, mentale factoren, perceptuele factoren, psychosociale factoren en vaardigheden.

Deze laatste categorie, vaardigheden, wordt relatief weinig besproken in de literatuur omtrent OP, in vergelijking met de overige vier. Doel van dit onderzoek is dan ook bekijken of de integratie van vaardigheden in planningsproblemen kan leiden tot betere prestaties van het OP systeem. Hiervoor werd eerst een poging gedaan het begrip vaardigheden te definiëren en vervolgens te verduidelijken met voorbeelden uit de literatuur. Vervolgens werden enkele bestaande modellen bekeken die menselijke factoren integreerden in planningsproblemen, al dan niet binnen het OP proces. Daarna werden enkele kritische opmerkingen gegeven omtrent deze modellen.

De belangrijkste bevindingen hierbij zijn het gebrek aan aandacht voor onderliggende factoren die mogelijk de resultaten beïnvloeden, zoals motivatie of vermoeidheid. Ook met de invloed van leereffecten en vergeten op het vaardigheidsniveau wordt doorgaans geen rekening gehouden. De afweging dient gemaakt te worden tussen de mogelijke voor- en nadelen van jobrotatie. Onder de voordelen vallen een bredere kennis van de werknemers, minder verveling en een lager ergonomisch risico. Onder de nadelen vallen het mogelijke verlies van productiviteit door taakspecialisatie en de kosten van toepassing van een rotatiesysteem. Het weinige onderzoek dat jobrotatie toepast focust niet altijd voldoende op deze afweging.

Daarbij zijn de voorgestelde verbeteringen niet altijd praktisch haalbaar of is er een kloof tussen de theoretisch optimale situatie en de praktijk, door het negeren van bepaalde factoren. Een voorbeeld hiervan is het aantal uren dat een werknemer minimaal ingezet moet worden opdat deze beschikbaar blijft.

Verder wordt het begrip "vaardigheden" te vaag bevonden, een duidelijke definitie binnen de context van dit onderzoek werd niet in de bestaande literatuur teruggevonden. Voor dit onderzoek wordt uitgegaan van drie aandachtspunten: vaardigheden zijn het vermogen bepaalde taken uit te voeren, vaardigheden kunnen verbeterd worden en beter ontwikkelde vaardigheden leiden tot een betere uitvoering. Het verder definiëren en afbakenen van vaardigheden kan dan ook het onderwerp zijn van toekomstig onderzoek. Ook werd herhaaldelijk aangehaald dat vaardigheden moeilijk te meten zijn. In de huidige literatuur worden vaardigheden vaak ook niet als een aparte categorie gezien, maar vallen deze onder de andere vier categorieën (fysieke factoren, mentale factoren, perceptuele factoren en psychosociale factoren). Wanneer vaardigheden niet als een aparte categorie beschouwd worden, kan de bestaande literatuur omtrent de andere vier factoren geraadpleegd worden aangaande de implementatie in planningsproblemen.

Ten slotte meten de besproken modellen niet per se een vaardigheid, wel de mate waarin een werknemer uitblinkt in één bepaalde taak. Dat is niet volgens alle definities hetzelfde als vaardigheden, die voor meerdere diverse taken een betere prestatie zouden moeten opleveren.

Gezien het gebrek aan onderzoek dat rekening houdt met factoren zoals vermoeidheid, verveling en leereffecten, de mogelijke voordelen van jobrotatie en het belang van menselijke factoren bij een optimale taaktoewijzing wordt in het empirisch deel van dit onderzoek hier verder op ingegaan.

3 EMPIRISCH ONDERZOEK

Het empirisch deel van dit onderzoek begint met een toelichting omtrent de keuze voor een specifiek planningsprobleem en een model dat in deze sectie uitgebreid behandeld zullen worden. Vervolgens zal op basis van enkele bestaande modellen met een gelijkaardig doel, maar in een andere context een eenvoudig model gepresenteerd en besproken worden. Tot slot volgt de bespreking van de resultaten van het opgestelde model, hetgeen de basis vormt voor de conclusie en kritische bedenkingen van dit onderzoek. Het doel van dit empirisch onderzoek is het integreren van verschillende factoren die in het reeds bestaand onderzoek (gedeeltelijk) achterwege zijn gelaten.

3.1 Introductie model

In de conclusie van het literatuurdeel van dit onderzoek werd reeds aangehaald dat de motivatie van een werknemer kan afnemen bij het herhaaldelijk uitvoeren van taken. Daarbij werd vermeld dat bestaande modellen hier niet genoeg rekening mee houden, aangezien deze modellen de beter presterende werknemers steeds aan dezelfde taken toewijzen. Verder werd aangehaald dat ook positieve leereffecten, die kunnen optreden wanneer iemand een bepaalde taak herhaaldelijk uitvoert, doorgaans niet mee in rekening worden genomen. De afweging dient dus gemaakt te worden tussen de voordelen en nadelen van het herhaaldelijk uitvoeren van dezelfde taken. Vanwege deze twee tekortkomingen in de bestaande modellen en vanwege de mogelijke voordelen van jobrotatie, zoals reeds besproken in sectie 2.9, zal in dit empirisch deel de focus op deze afweging liggen.

3.2 Algemene kenmerken van het model

Het model simuleert een situatie waar vijf werknemers in een magazijn toegewezen worden aan vijf verschillende taken. Deze taken kunnen er in de realiteit als volgt uitzien:

- Een werknemer gaat goederen verzamelen voor bestellingen in zone A, waar kleine onderdelen in rekken met bakken liggen en met de hand verzameld worden per bestelling. Hij brengt deze vervolgens wandelend met een kar naar de *dispatch* zone. Dit is taak 1.
- Een werknemer gaat de bakken met onderdelen in zone A aanvullen. Hij haalt deze onderdelen al wandelend met een kar in de *receiving* zone. Dit is taak 2.
- Een werknemer gaat goederen verzamelen voor bestellingen in zone B, waar grote onderdelen op pallets op vloerniveau klaarliggen die met een elektrische transpallet gehaald moeten worden. Hij brengt deze vervolgens naar de *dispatch* zone. Dit is taak 3.
- Een werknemer gaat goederen in zone B met een heftruck of reachtruck verplaatsen vanuit hogere niveaus in de rekken naar vloerniveau. Dit is taak 4.
- Een werknemer gaat de hogere niveaus in de rekken van zone B aanvullen met een heftruck of reachtruck. Hij haalt de goederen in de *receiving* zone. Dit is taak 5.

Er wordt verondersteld dat alle werknemers gecertificeerd zijn om alle taken uit te mogen voeren. Alhoewel deze taken dus uitvoerbaar zijn door alle werknemers in het magazijn, zullen bepaalde

werknemers toch beter of minder goed presteren bij het uitvoeren van bepaalde taken. Zo zullen werknemers die behendiger zijn met het bedienen van een heftruck of reachtruck meer goederen kunnen verwerken binnen een tijdspanne dan collega's die minder behendig zijn in het bedienen van het *material handling equipment* (MHE). Een ander voorbeeld is een werknemer die sneller wandelt dan zijn collega's en hierdoor zal uitblinken in taken 1 en 2. Enkele andere voorbeelden die bij het uitvoeren van bepaalde taken een voordeel kunnen opleveren zijn het vermogen om goederen te stapelen op een kar of transpallet (Matusiak et al., 2017), het vermogen om locaties te onthouden (Mou, 2022) of het vermogen de correcte bakken of locaties waar te nemen (Vijayakumar et al., 2022).

Samengevat bevat het model de volgende elementen:

- Vijf werknemers (Werknemer 1, Werknemer 2, Werknemer 3, Werknemer 4, Werknemer 5)
- Vijf taken die uitgevoerd dienen te worden (Taak 1, Taak 2, Taak 3, Taak 4, Taak 5)
- Een vaardigheidsniveau per taak bij elke werknemer, tussen 80 en 120
- Een werkweek van 5 werkdagen, elke werkdag duurt 8 uur

Afhankelijk van het vaardigheidsniveau zal een werknemer een bepaalde output genereren. Aanvankelijk is dit 100 voor vaardigheidsniveau 100. Deze 100 kan gezien worden als 100%, namelijk de verwachte gemiddelde output voor deze taak. Indien een werknemer boven niveau 100 zit, zal hij/zij de taak sneller uitvoeren en dus per gewerkt uur meer output genereren. Indien deze hier onder niveau 100 zit zal deze taak langer in beslag nemen. De maximale toename en afname in snelheid zijn respectievelijk +20% en -20% voor een vaardigheidsniveau van 120 en 80. Voor een niveau van 110 is dit 10%, voor een niveau van 105 is dit 5% enzovoort. Deze waarden zijn gebaseerd op de waarden die gebruikt worden in het onderzoek van McDonald et al. (2009) en Rinaldi et al. (2022). Het aantal units dat per uur gegenereerd wordt is dus gelijk aan het vaardigheidsniveau, dit om het model eenvoudig en duidelijk te houden, zeker wanneer leereffecten en dergelijke toegevoegd worden.

Er worden tien inputmatrices voor het model opgesteld. Bij de eerste vijf inputmatrices zijn de vaardigheidsniveaus willekeurig bepaald. De exacte werkwijze in Microsoft Excel wordt besproken in bijlage 1. De andere vijf inputmatrices zijn zo opgesteld om extreme gevallen voor te stellen. Meer concreet:

- Inputmatrix 1-5: Random
- Inputmatrix 6: Alle werknemers zijn hetzelfde. Het vaardigheidsniveau voor elke taak is hetzelfde.
- Inputmatrix 7: Het vaardigheidsniveau verschilt per werknemer, maar is hetzelfde voor elke taak.
- Inputmatrix 8: Het vaardigheidsniveau verschilt per taak, maar is hetzelfde voor elke werknemer.
- Inputmatrix 9: Elke werknemer blinkt uit in een andere taak. Het vaardigheidsniveau voor de overige taken is gelijk.
- Inputmatrix 10: Elke werknemer presteert het beste en het minst goed in andere taken.

Het vaardigheidsniveau van elke werknemer voor elke taak is gegeven in tabel 4. Per taak is het hoogste vaardigheidsniveau vetgedrukt. Dit voor de tien inputmatrices.

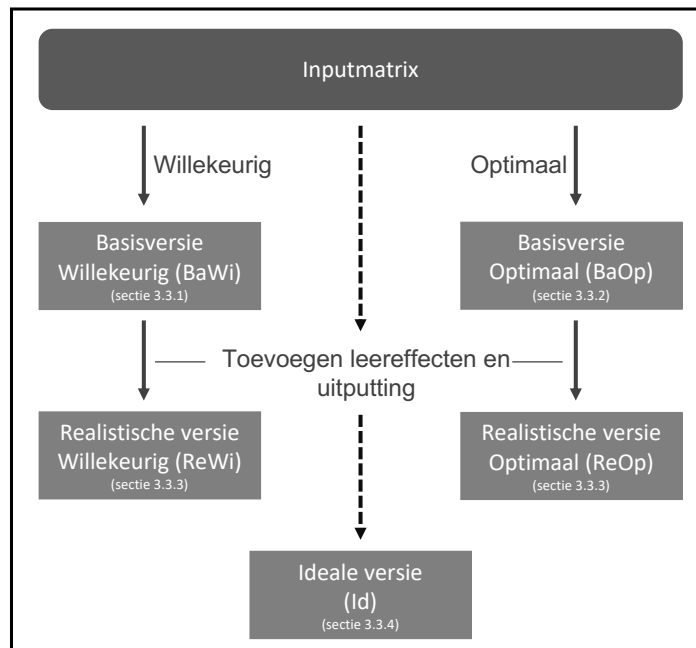
Tabel 4: de inputmatrices (vaardigheidsniveau per taak, per werknemer, per matrix)						
Matrix	Werknemers	Taak 1	Taak 2	Taak 3	Taak 4	Taak 5
1	Werknemer 1	117	103	93	92	99
	Werknemer 2	102	105	113	103	88
	Werknemer 3	82	92	86	105	80
	Werknemer 4	101	101	114	102	82
	Werknemer 5	94	90	116	84	96
2	Werknemer 1	89	87	98	83	106
	Werknemer 2	99	97	116	93	115
	Werknemer 3	120	117	88	91	114
	Werknemer 4	80	117	95	89	114
	Werknemer 5	105	85	107	83	118
3	Werknemer 1	90	96	115	106	90
	Werknemer 2	83	81	91	85	117
	Werknemer 3	90	108	118	120	90
	Werknemer 4	96	106	120	108	87
	Werknemer 5	88	96	116	81	108
4	Werknemer 1	119	112	87	106	115
	Werknemer 2	104	94	95	106	96
	Werknemer 3	85	80	115	117	94
	Werknemer 4	106	103	118	116	115
	Werknemer 5	120	101	113	107	104
5	Werknemer 1	94	92	95	88	85
	Werknemer 2	100	96	86	114	112
	Werknemer 3	106	88	107	99	117
	Werknemer 4	110	97	92	103	87
	Werknemer 5	82	114	85	116	86

	Werknemer 1	100	100	100	100	100
	Werknemer 2	100	100	100	100	100
6	Werknemer 3	100	100	100	100	100
	Werknemer 4	100	100	100	100	100
	Werknemer 5	100	100	100	100	100
	Werknemer 1	110	110	110	110	110
	Werknemer 2	105	105	105	105	105
7	Werknemer 3	100	100	100	100	100
	Werknemer 4	95	95	95	95	95
	Werknemer 5	90	90	90	90	90
	Werknemer 1	110	105	100	95	90
	Werknemer 2	110	105	100	95	90
8	Werknemer 3	110	105	100	95	90
	Werknemer 4	110	105	100	95	90
	Werknemer 5	110	105	100	95	90
	Werknemer 1	110	90	90	90	90
	Werknemer 2	90	110	90	90	90
9	Werknemer 3	90	90	110	90	90
	Werknemer 4	90	90	90	110	90
	Werknemer 5	90	90	90	90	110
	Werknemer 1	110	105	100	95	90
	Werknemer 2	90	110	105	100	95
10	Werknemer 3	95	90	110	105	100
	Werknemer 4	100	95	90	110	105
	Werknemer 5	105	100	95	90	110

3.3 Het model

Er worden verschillende versies van het model opgesteld, waarbij telkens een andere oplossingsmethode gebruikt wordt of elementen worden toegevoegd. Om het overzicht te bewaren zijn de verschillende versies en hun onderlinge relaties voorgesteld in figuur 3. De verschillende

versies worden hier kort overlopen, een meer uitgebreide bespreking volgt per versie in de volgende subsecties.



Figuur 3: de verschillende versies van het model

Er worden aanvankelijk twee oplossingsmethoden toegepast om vanuit de inputmatrices de basisversies te bekomen, namelijk een willekeurige toewijzing en een geoptimaliseerde toewijzing. Bij de willekeurige toewijzing worden taken willekeurig aan werknemers toegewezen, geen rekening houdend met hun vaardigheden, deze versie krijgt de naam Basisversie Willekeurig (BaWi). Bij de geoptimaliseerde toewijzing worden taken toegewezen aan werknemers om een optimale output te bekomen, deze versie krijgt de naam Basisversie Optimaal (BaOp).

Vervolgens worden beide basisversies uitgebreid door het opnemen van leereffecten en uitputting. De toewijzing blijft zoals in de basisversies, enkel de output wordt dus herberekend. De BaWi leidt zo tot de Realistische versie Willekeurig (ReWi) en de BaOp leidt tot de Realistische versie Optimaal (ReOp). Zowel ReWi als ReOp kennen geen jobrotatie, i.e. elke werknemer voert gedurende de hele planningsperiode eenzelfde taak uit.

Tot slot wordt de laatste versie opgesteld, waarbij de taaktoewijzing pas na het toevoegen van leereffecten en uitputting zal plaatsvinden. Deze worden dus mee in rekening genomen bij de optimalisatie van de toewijzing. Deze versie krijgt de naam Ideale versie (Id). Deze versie kent wel jobrotatie.

3.3.1 Basisversie Willekeurig (BaWi)

De eerste versie van het model is de meest eenvoudige. Dit is een zeer onrealistisch model en dient louter als basis voor de volgende modellen en het vergelijken van de resultaten. In deze basisversie er is geen sprake van job rotatie en er wordt er geen rekening gehouden met vaardigheden of factoren zoals leereffecten, motivatie, vermoeidheid en dergelijke. De vijf werknemers worden willekeurig aan een taak toegewezen en voeren deze taak gedurende de hele werkweek uit. De snelheid waarmee een werknemer een taak uitvoert hangt enkel af van het vaardigheidsniveau dat deze werknemer voor deze taak bezit.

De willekeurige verdeling werd gedaan door gebruik te maken van Microsoft Excel. De verdelingen zijn weergegeven in tabel 5.

Inputversie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Werknemer 1	2	4	2	4	4	2	3	2	5	3
Werknemer 2	5	3	5	5	2	5	2	1	2	1
Werknemer 3	3	2	1	2	3	4	4	4	1	5
Werknemer 4	1	1	4	1	5	1	5	5	3	2
Werknemer 5	4	5	3	3	1	3	1	3	4	4

De resultaten van deze verdeling zijn weergegeven in tabel 6. Het gemiddeld vaardigheidsniveau geeft de gemiddelde waarde van al de vaardigheidsniveaus in het model weer. Dat is dus de som van alle waarden in de desbetreffende inputmatrix gedeeld door het aantal waarden. Deze waarde zal bij de volgende versies dienen als basis voor het vergelijken van de prestaties. Het gemiddeld toegewezen vaardigheidsniveau geeft de gemiddelde waarde van de toegewezen taken weer; in versie 1 is dat dus het vaardigheidsniveau van werknemer 1 voor taak 2, werknemer 2 voor taak 5, etc. Verder zijn de gemiddelde en totale output die behaald worden wanneer een werknemer de toegewezen taak gedurende de 40 uren uitvoert, weergegeven. Tot slot worden ook de theoretisch minimale, gemiddelde en maximale output die behaald kan worden weergegeven. De theoretische minimale output slaat op een situatie waar elke werknemer voor elke taak het minimale vaardigheidsniveau van 80 heeft. Wanneer we deze waarde vermenigvuldigen met vijf werknemers en 40 uren bekomen we 16000. Dit is analoog voor de gemiddelde en maximale output, respectievelijk met een vaardigheidsniveau van 100 en 120.

Tabel 6: de resultaten van de Basisversie Willekeurig

	Inputmatrix									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Gemiddeld vaardigheidsniveau	97,6	100,24	99,44	105,12	98,04	100	100	100	94	100
Gemiddeld toegewezen vaardigheidsniveau	92,4	102,8	105,4	100,2	92	100	100	100	94	95
Gemiddelde output	3696	4112	4216	4008	3680	4000	4000	4000	3760	3800
Totale output	18480	20560	21080	20040	18400	20000	20000	20000	18800	19000
Theoretisch minimale output						16000				
Theoretisch gemiddelde output						20000				
Theoretische maximale output						24000				

3.3.2 Basisversie Optimaal (BaOp)

De volgende stap in dit onderzoek is het optimaliseren van de basisversie met willekeurige toewijzing. Deze eerste versie van het geoptimaliseerde model krijgt de naam Basisversie Optimaal (BaOp). Deze versie blijft zeer eenvoudig en onrealistisch. Er wordt nog steeds geen rekening gehouden met factoren zoals leereffecten, motivatie, vermoeidheid en dergelijke. Wel wordt getracht de output te maximaliseren door rekening te houden met het vaardigheidsniveau van de werknemers bij de taaktoewijzing.

Dit is een soort toewijzingsprobleem en kan opgelost worden door gebruik te maken van lineaire optimalisatie. Het doel is de totale output (P_{tot}) te maximaliseren, door de werknemers (W) zo efficiënt mogelijk te verdelen over de taken (T). Er wordt gebruik gemaakt van de volgende variabelen en parameters:

Symbol	Algemeen	Aanvullend
w	Werknemer index, w= 1, 2, 3, ..., W	In deze studie: w = 1, 2, 3, 4, 5
j	Taak index, j= 1, 2, 3, ..., J	In deze studie: j = 1, 2, 3, 4, 5
P _{tot}	De totale output	
x _{wj}	Een binaire variabele die 1 zal zijn als taak j uitgevoerd wordt door werknemer w en nul indien dit niet het geval is.	Bijvoorbeeld: x ₃₄ is 1 indien taak 4 door werknemer 3 wordt uitgevoerd, 0 indien dit niet het geval is.
p _{wj}	Parameter die de output per uur van werknemer w voor taak j weergeeft.	Bijvoorbeeld: p ₃₄ is 105 in model 1, dit wil zeggen dat er 105 units per uur gegenereerd worden indien werknemer 3 taak 4 uitvoert.
W	Het totaal aantal werknemers	In deze studie: W = 5
J	Het totaal aantal taken	In deze studie: J = 5

De doelfunctie van het model is het maximaliseren van de totale output en kan beschreven worden als (het lineair probleem):

$$\text{MAX } P_{\text{tot}} = \sum_{w=1}^W \sum_{j=1}^J x_{wj} * p_{wj} \quad (1)$$

Met als beperkingen

$$\sum_{w=1}^W x_{wj} = 1 \quad \forall j \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{wj} = 1 \quad \forall w \quad (3)$$

$$x_{wj} \in (0, 1) \quad \forall w, j \quad (4)$$

Beperking 2 zorgt ervoor dat elke taak aan slechts één werknemer toegewezen wordt. Beperking 3 zorgt ervoor dat elke werknemer slechts één taak krijgt toegewezen. Beperking 4 geeft aan dat x_{wj} een binaire variabele is.

Er wordt voor dit onderzoek gebruik gemaakt van LINGO, een uitgebreide tool die is ontworpen om onder andere lineaire en niet-lineaire optimalisatiemodellen snel en efficiënt te bouwen en op te lossen. Het oplossen van het toewijzingsprobleem (BaOp) leidt tot de optimale taakverdelingen voor de tien inputmatrices. De verdelingen zijn weergegeven in tabel 7. Voor een volledig overzicht van de verdelingen en de daarbij horende vaardigheidsniveaus kan bijlage 2 geraadpleegd worden. Bijlage 2 bevat de volledig tabel, de onderlijnde waardes geven weer welke taak door welke werknemer uitgevoerd wordt.

Tabel 7: De taakverdeling (per werknemer, per inputversie)

Inputversie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Werknemer 1	1	4	1	2	3	1	1	1	1	1
Werknemer 2	2	3	5	4	4	2	2	2	2	2
Werknemer 3	4	1	4	3	5	3	3	3	3	3
Werknemer 4	3	2	2	5	1	4	4	4	4	4
Werknemer 5	5	5	3	1	2	5	5	5	5	5

De output die behaald wordt door deze verdelingen kan afgelezen worden in tabel 8.

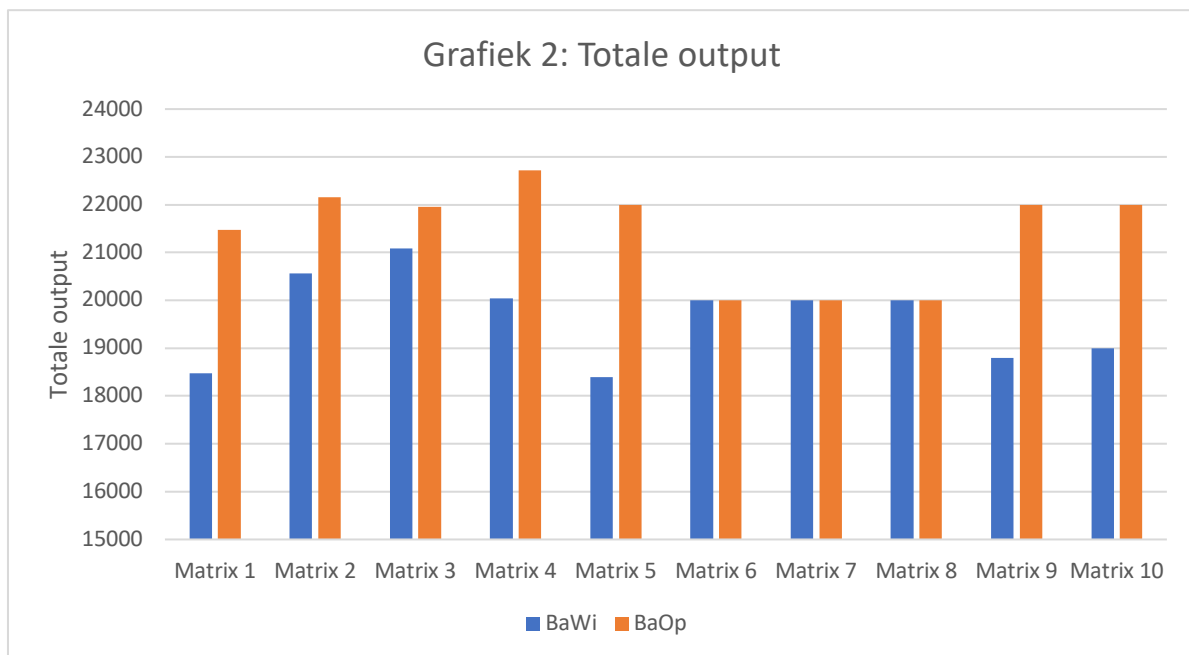
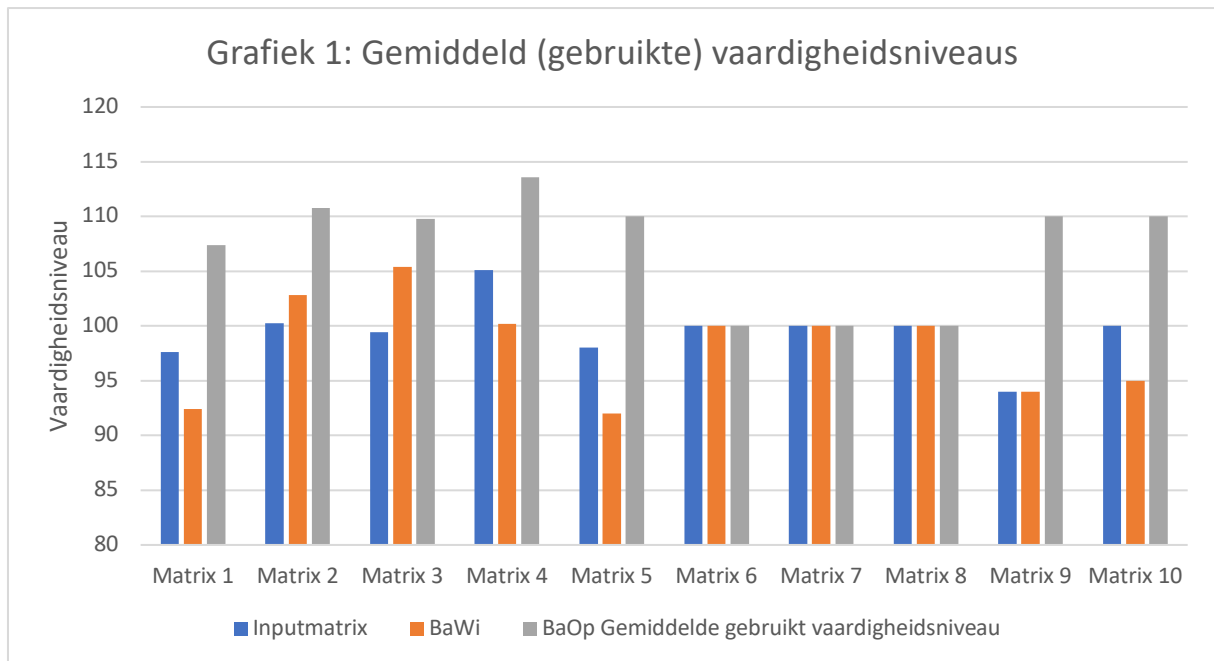
Tabel 8: de resultaten van de Basisversie Optimaal

Inputmatrix	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Gemiddeld vaardigheidsniveau	97,6	100,24	99,44	105,12	98,04	100	100	100	94	100
Gemiddelde gebruikt vaardigheidsniveau	107,4	110,8	109,8	113,6	110	100	100	100	110	110
Totale output	21480	22160	21960	22720	22000	20000	20000	20000	22000	22000
Gemiddelde output	4296	4432	4392	4544	4400	4000	4000	4000	4400	4400
Theoretisch minimale output						16000				
Theoretisch gemiddelde output						20000				
Theoretische maximale output						24000				

Het verschil tussen de resultaten van de Basisversie Willekeurig en die van de Basisversie Optimaal is duidelijk zichtbaar in grafieken 1 en 2. Waar bij de BaWi het gemiddeld vaardigheidsniveau van de werknemers voor hun toegewezen taak nog in enkele inputmatrices (matrix 1, matrix 4, matrix 5 en matrix 10) onder het gemiddeld vaardigheidsniveau over alle taken lag, ligt dat na de optimalisatie hoger of gelijk bij alle inputmatrices.

De totale output die behaald wordt neemt gemiddeld met 9,4% toe. Dit is zelfs 12% voor de willekeurig opgestelde inputmatrices. Het gebrek aan toename van zowel het gemiddeld vaardigheidsniveau als de totale output bij matrices zes, zeven en acht valt te verklaren door de aard van deze inputmatrices. Deze zijn zo opgesteld dat ze extreme gevallen voorstellen waarbij er

geen verschil is tussen de werknemers of de taken, waardoor een optimale verdeling even goed presteert als een random toegewezen verdeling. Een meer diepgaande bespreking en een conclusie volgt na de resultaten van de laatste versie van het model.



3.3.3 Realistische versie Willekeurig (ReWi) en Realistische versie Optimaal (ReOp)

De volgende stap in het realistischer maken van de modellen is het toevoegen van leereffecten. Zoals eerder aangehaald in het literatuurdeel van dit onderzoek bestaan er tal van verschillende leercurves die gebruikt worden in soortgelijk onderzoek, maar de curve van Wright is het prominente model vanwege zijn eenvoud (Grosse en Glock, 2013). Daarbij is de relevantie van deze curve in een OP context reeds aangetoond in onder andere het onderzoek van Grosse en Glock (2013) en het onderzoek van Stinson (2014). De leercurve van Wright zal dan ook verder gebruikt worden in dit onderzoek.

De leercurve van Wright veronderstelt dat de tijd die nodig is om een bepaalde taak uit te voeren afneemt met een vast percentage per keer dat de cumulatieve output verdubbelt. Dit kan voorgesteld worden als:

$$\hat{T}_x = T_1 x^{-b}$$

Waarbij \hat{T}_x de benodigde tijd is om de x-de unit te produceren. T_1 is de tijd die nodig is om de eerste unit te produceren, x is de cumulatieve productie en b is de leerexponent ($0 \leq b < 1$) waarbij b gelijk is aan $-\log(LR)/\log(2)$ en LR slaat op de *learning rate*. Een concreet cijfervoorbeeld voor een *learning rate* van 95% en bijgevolg een leerexponent van 0,07400058 is weergegeven in tabel 9.

Tabel 9: Voorbeeld productietijden met leereffecten	
Cumulatieve productie	Benodigde tijd (in minuten)
1	5
2	4,75
3	4,60959483
4	4,5125
5	4,43859805
6	4,37911509
7	4,32944531
8	4,286875

We zien dat het produceren van de eerste unit vijf minuten in beslag neemt. De productie van de tweede eenheid zal nog maar 4,75 minuten in beslag nemen. Dit is 95% van de tijd nodig voor de eerste unit. Wanneer de cumulatieve productie nogmaals verdubbelt en dus vier is, zal de productie slechts 4,5125 minuten in beslag nemen. Dit is 95% van de tijd nodig voor de productie van de 2^e unit. Bij een cumulatieve productie van acht units zal de tijd benodigde nogmaals met 5% afnemen ten opzichte van een cumulatieve productie van vier.

Deze *learning rate* van 95% is realistisch in de context van orderpicken; dit is aangetoond in diverse onderzoeken (Grosse en Glock, 2013; Asadayoobi et al., 2021; Stinson, 2014). Er zal in dit onderzoek dan ook verder van deze waarde gebruik gemaakt worden.

Zoals eerder aangehaald wordt vanwege de eenvoud in deze studie gebruik gemaakt van het aantal gegenereerde units per tijdseenheid in plaats van de benodigde tijd om een taak uit te voeren. Natuurlijk zijn deze afhankelijk van elkaar. Vanwege deze afhankelijkheid kan er dan ook een formule opgesteld worden voor het aantal gegenereerde units, afhankelijk van de opeenvolgende tijdsblokken dat men een taak uitvoert. Dit kan voorgesteld worden als:

$$\hat{p}_t = p_1 t^b$$

Waarbij \hat{p}_t het aantal gegenereerde units is in tijdsblok t . De factor p_1 is het aantal gegenereerde units in tijdsblok 1. De factor t is het voorgaande tijdsblokken dat de taak werd uitgevoerd en b is de leerexponent ($0 \leq b < 1$) waarbij b gelijk is aan $-\log(\text{LR})/\log(2)$ en LR slaat op de *learning rate*. Dit wordt geïllustreerd voor een vaardigheidsniveau en dus productie per uur van 100 in tabel 10. De *learning rate* is hier 95%, de leerexponent bij gevolg 0,07400058.

Tijdsblok	Productie per uur
1	100
2	105,263158
3	108,469403
4	110,803324
5	112,648182
...	...
40	131,387295

Het is echter niet realistisch dat de output van een werknemer eindeloos blijft toenemen indien hij dezelfde taak blijft uitvoeren. Zoals eerder in dit onderzoek reeds enkele keren werd aangehaald wordt orderpicken gekenmerkt door zeer repetitief werk. Hierdoor kan vermoeidheid optreden, hetgeen de toegenomen productiviteit door leereffecten van een werknemer negatief kan beïnvloeden naarmate hij een taak herhaaldelijk uitvoert (Winkelhaus et al., 2018). Schlick et al. (2010) associëren vermoeidheid met een afgenomen prestatie, waarbij de prestatie proportioneel afneemt wanneer vermoeidheid toeneemt. Het onderzoek van Asadayoobi et al. (2021) beschrijft de negatieve invloed van vermoeidheid op leereffecten. Vermoeidheid kan zowel mentaal als fysiek zijn (Granotto et al., 2019) en het is vooral de mentale vermoeidheid die in de literatuur gelinkt wordt aan repetitief werk (Hod, 2022).

Om vermoeidheid in een wiskundig model te implementeren is het nodig de impact cijfermatig voor te stellen. Hiervoor werd in de literatuur gezocht naar een basis of reeds concrete gegevens. In eerste instantie werden er 54 studies teruggevonden omtrent vermoeidheid bij repetitief werk of in de context van orderpicken. Van deze studies bleken er slechts 35 relevant en slechts negen kenden een concrete waarde toe aan vermoeidheid. Dit zijn de studies van Winkelhaus et al. (2018), Asadayoobi et al. (2021), Sievertsen et al. (2016), Stinson (2014), Granotto et al. (2019), Potvin (2012), Calzavara et al. (2019), Glock et al. (2019) en Bechtold et al. (1984).

Het merendeel hiervan focust enkel op fysieke vermoeidheid en baseert zich op het onderzoek van Calzavara et al. (2018) dat de invloed van fysiek uitputtend werk op de hartslag van werknemers bestudeert. Ook omtrent optimale frequentie van jobrotatie werden geen bruikbare concrete gegevens teruggevonden in de huidige literatuur.

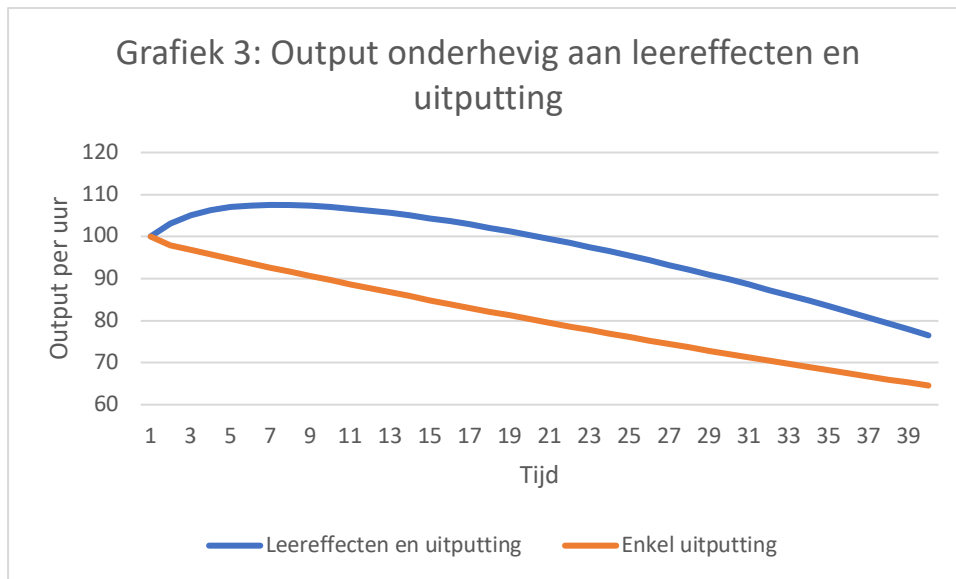
Het onderzoek van Aziz et al. uit 2010 beschrijft een positieve correlatie tussen het herhaaldelijk uitvoeren van taken en de verveling van werknemers. Het onderzoek stelt dat jobrotatie gebruikt kan worden om deze verveling te reduceren en bovendien de motivatie van werknemers toe te laten nemen. Gezien het gebrek aan concrete gegevens omtrent vermoeidheid en het meespelen van tal van andere (psychologische) factoren zoals onder andere motivatie, zal er verder in dit onderzoek gebruikt gemaakt worden van de term "uitputting". Uitputting omvat dus zowel de fysieke en mentale effecten van vermoeidheid, als psychosociale effecten zoals motivatie en verveling.

De output op tijdstip t kan dan worden voorgesteld als:

$$\hat{p}_t = p_1(t^b - m^t + 1)$$

Waarbij \hat{p}_t het aantal gegenereerde units is in tijdsblok t . De factor p_1 is het aantal gegenereerde units in tijdsblok 1. De factor t is het aantal opeenvolgende tijdsblokken dat de taak wordt uitgevoerd en b is de leerexponent ($0 \leq b < 1$) waarbij b gelijk is aan $-\log(LR)/\log(2)$ en LR slaat op de *learning rate*. De factor m stelt de invloed van uitputting voor.

Een realistische waarde vinden voor m vormt een hele uitdaging waarbij de nodige assumpties gemaakt moeten worden. Het is immers onmogelijk om de motivatie, vermoeidheid, leereffecten en dergelijke volledig correct te meten en wiskundig voor te stellen, gezien de vele onderliggende factoren verschillen tussen werknemers en de onduidelijke afbakening van de begrippen. In dit onderzoek zal m een waarde van 1,011 aannemen, deze waarde is arbitrair bepaald, doch gebaseerd op literatuur, zoals verder in deze sectie wordt toegelicht. Dit wordt toegepast op het voorbeeld met een vaardigheidsniveau en dus productie per uur van 100 en een *learning rate* van 95%. De resultaten zijn weergegeven in grafiek 3.



De productiviteit zal dus — onder invloed van zowel leereffecten als uitputting — eerst toenemen en een maximum bereiken na ongeveer zeven uur. Vanaf dan zal de negatieve invloed van uitputting op de productiviteit groter zijn dan de positieve invloed van leereffecten. De productiviteit zal dus afnemen en na 20 uren zelfs zakken onder de oorspronkelijke waarde. Dit wordt grafisch weergegeven door de blauwe curve. Wanneer er geen leereffecten zouden plaatsvinden zou de productiviteit meteen afnemen zoals geïllustreerd door de oranje curve.

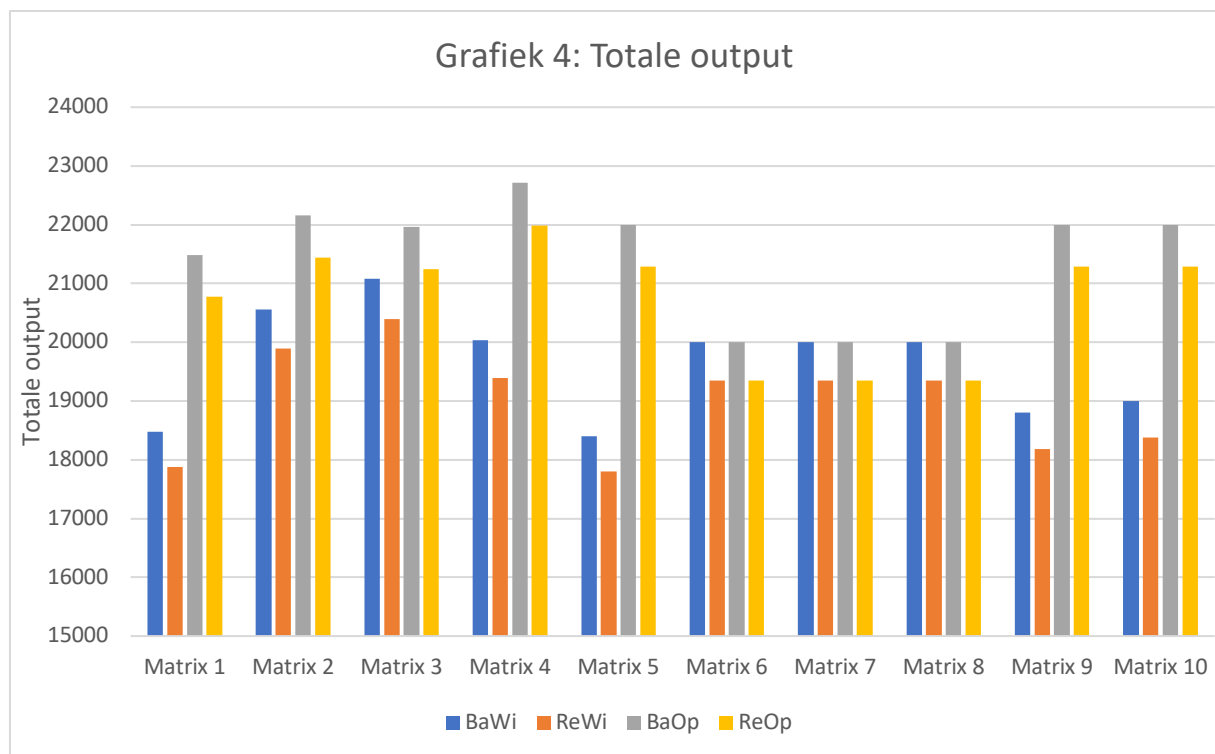
Deze waarden liggen in lijn met het onderzoek van Sievertsen et al. uit 2016 dat stelt dat cognitieve vermoeidheid tot een prestatievermindering van ongeveer 1% per uur kan leiden. Uitputting zal namelijk een afname van ongeveer 10% na tien uur teweegbrengen. Ook het onderzoek van Granotto et al. uit 2019 spreekt van een realistische afname van 10% na het herhaaldelijk uitvoeren van dezelfde taak gedurende een volledige werkdag (acht uren). De maximale productiviteit na ongeveer zeven uren en de daling onder de oorspronkelijke waarde na ongeveer 20 uren zouden ook gelinkt kunnen worden aan de psychologische drempel waarbij respectievelijk gedurende een volledige werkdag en gedurende een halve werkweek dezelfde taak wordt uitgevoerd.

Het herrekenen van de beide basisversies, rekening houdend met leereffecten en uitputting, leidt tot de twee realistische versies van het model (ReWi en ReOp). Deze versies dienen voornamelijk als maatstaf voor vergelijking met het volgende model. De resultaten zullen in deze sectie dan ook slechts kort besproken worden. De output van de twee realistische versies kan afgelezen worden in tabel 11. De waarden zijn afgerond tot gehele getallen om de tabel overzichtelijker te maken. De tabel met de exacte waarde kan geraadpleegd worden in bijlage 3. De concrete taaktoewijzing wijzigt niet tussen de basisversies en de realistische versies.

Tabel 11: resultaten van de realistische versies

Inputmatrix	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>ReWi</i>										
Totale output	17878	19891	20394	19387	17801	19349	19349	19349	18188	18381
Gemiddelde output	3576	3978	4079	3878	3560	3870	3870	3870	3638	3676
<i>ReOp</i>										
Totale output	20781	21438	21245	21980	21284	19349	19349	19349	21284	21284
Gemiddelde output	4156	4288	4249	4396	4257	3870	3870	3870	4257	4257

Het verschil tussen de resultaten van de basisversies en die van de realistische versies is duidelijk zichtbaar in grafiek 4.



De totale output ligt voor beide oplossingsmethoden lager in de realistische versie dan in de basisversie. Dit is eenvoudig te verklaren: zoals eerder in deze sectie werd aangehaald zal na een 20-tal uren de productiviteit van een werknemer zakken onder de oorspronkelijke productiviteit. Wanneer een werknemer een taak gedurende de hele week zou uitvoeren zal zijn productiviteit per uur uiteindelijk 25 procent beneden zijn oorspronkelijke productiviteit liggen. De totale productiviteitsdaling door uitputting blijkt dus groter dan de totale productiviteitsstijging door leereffecten. Als gevolg zullen werknemers die een taak nog niet hebben uitgevoerd waarschijnlijk een hogere output genereren dan werknemers die een taak al gedurende lange tijd uitvoeren. Er zal derhalve jobrotatie moeten toegepast worden om een optimale output te bekomen.

Het volstaat dus niet om de taaktoewijzing te optimaliseren aan de hand van het vaardigheidsniveau van de werknemers op het moment dat zij aan een taak beginnen, zonder rekening te houden met leereffecten en uitputting. Dit brengt ons bij de laatste versie van het model.

3.3.4 Ideale versie

Wanneer we rotatie gaan opnemen in het model volstaat het niet meer te weten welke werknemer welke taak uitvoert. Vanaf dan is het immers ook nodig te weten welke taak door welke werknemer wordt uitgevoerd op eender welk moment. Dit kan door de oorspronkelijke doelfunctie uit te breiden met een extra subscript, i.e. de parameter t , die het tijdstip aangeeft. Dit resulteert in de volgende aangepaste parameters en variabelen.

Symbol	Algemeen	Aanvullend
w	Werknemer index, $w = 1, 2, 3, \dots, W$	In deze studie: $w = 1, 2, 3, 4, 5$
j	Taak index, $j = 1, 2, 3, \dots, J$	In deze studie: $j = 1, 2, 3, 4, 5$
t	Tijdstip index, $t = 1, 2, 3, \dots, T$	In deze studie: $t = 1, 2, 3, \dots, 40$
P_{tot}	De totale output	
x_{wjt}	Een binaire variabele die 1 zal zijn als taak j uitgevoerd wordt door werknemer w op tijdstip t en nul indien dit niet het geval is.	Bijvoorbeeld: x_{346} is 1 indien taak 4 door werknemer 3 wordt uitgevoerd op tijdstip 6, 0 indien dit niet het geval is.
\hat{p}_{wjt}	Coëfficiënt die de output per uur van werknemer w voor taak j geeft op tijdstip t .	Bijvoorbeeld: \hat{p}_{341} is 105 in model 1, dit wil zeggen dat er 105 units per uur gegenereerd worden indien werknemer 3 taak 4 uitvoert op tijdstip 1.
b	Leerexponent	In deze studie: b is 0,07400058, afgeleid van een LR van 0,95.
m	Waarde van uitputting	In deze studie: $m = 1,011$
W	Het totaal aantal werknemers	In deze studie: $W = 5$
J	Het totaal aantal taken	In deze studie: $J = 5$
T	Het laatste tijdstip van het model	In deze studie: $T = 40$

Om het model niet onnodig complex te maken en de oplosbaarheid met LINGO te waarborgen worden enkele assumpties gemaakt.

Zoals aangehaald in het literatuurdeel van dit onderzoek zullen buiten leereffecten ook invloeden van vergeten optreden. De invloed van vergeten, wanneer een taak gedurende een periode niet uitgevoerd wordt, wordt in dit model echter achterwege gelaten. Dit is een grote assumptie om te

maken maar het opnemen van vergeten maakt het reeds relatief ingewikkelde model nog complexer. Daarbij is de vergeetcurve in de literatuur een gespiegelde leercurve, wat ervoor zorgt dat wanneer een taak even lang niet uitgevoerd wordt dan wel, de leereffecten tenietgedaan zijn. Wanneer vergeten nog verder opduikt zou rotatie tegengegaan worden aangezien de productiviteit tot onder het oorspronkelijke niveau daalt. Het wordt echter als niet realistisch beschouwd dat vergeten net zo snel zal optreden als leren, hetgeen in de literatuur doorgaans toegepast wordt. Indien dit het geval zou zijn zouden al onze vaardigheden constant benut moeten worden om deze op pijl te houden. Een eenvoudig voorbeeld: iemand die dozen moet stapelen op een kar zal hier zeker tijdens zijn eerste werkuren veel efficiënter in worden, maar het is niet zo dat deze persoon na enkele uren rust of een andere taak zal vergeten hoe hij dozen best stapelt. Verder kunnen door het achterwege laten van vergeeteffecten op korte termijn de veertig periodes als opeenvolgende periodes beschouwd worden. Het opnemen van werkdagen en pauzes verhoogt nogmaals de complexiteit. Hierbij werd de afweging gemaakt het model op te stellen met 16 tijdsperiodes van een half uur, om zo één werkdag voor te stellen. Vanwege de duidelijkere resultaten en effecten van jobrotatie werd echter de beslissing genomen met 40 periodes te blijven werken.

Een tweede assumptie die gemaakt wordt ligt in lijn met het al dan niet bekijken van de week als een opeenvolgende periode. Zo zal er in dit model geen herstel optreden van uitputting wanneer een taak gedurende een bepaalde periode niet uitgevoerd wordt. Hierdoor zal de invloed van uitputting iets hoger liggen, hetgeen het achterwege laten van vergeten tegemoetkomt.

De doelfunctie is het maximaliseren van de totale output en kan beschreven worden als (het MINLP):

$$\text{MAX } P_{\text{tot}} = \sum_{t=1}^T \sum_{w=1}^W \sum_{j=1}^J x_{wjt} * \hat{p}_{wjt} \quad (1)$$

Waarbij

$$\hat{p}_{wjt} = p_{wj1} (d_{wjt})^b - (m)^{d_{wjt}} + 1$$

slaat op de productiviteit van werknemer w voor taak j op tijdstip t. De parameter d_{wjt} slaat op het aantal tijdsblokken dat taak j reeds uitgevoerd werd door werknemer w op tijdstip t. Dit kan beschreven worden als:

$$d_{wjt} = 1 + \sum_{t'=1}^{t-1} x_{wjt'}$$

Deze "teller" zal met een waarde van één beginnen, om te voorkomen dat er in de voorgaande vergelijking de waarde nul tot een macht verheven wordt, hetgeen de vergelijking tot nul zou reduceren.

De overige beperking zijn overeenkomstig met de vorige modellen:

$$\sum_{w=1}^W x_{wjt} = 1 \quad \forall j, t \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{wjt} = 1 \quad \forall w, t \quad (3)$$

$$x_{wjt} \in (0, 1) \quad \forall w, j, t \quad (4)$$

$$b_{wjt} \in \mathbb{Z} \quad \forall w, j, t \quad (5)$$

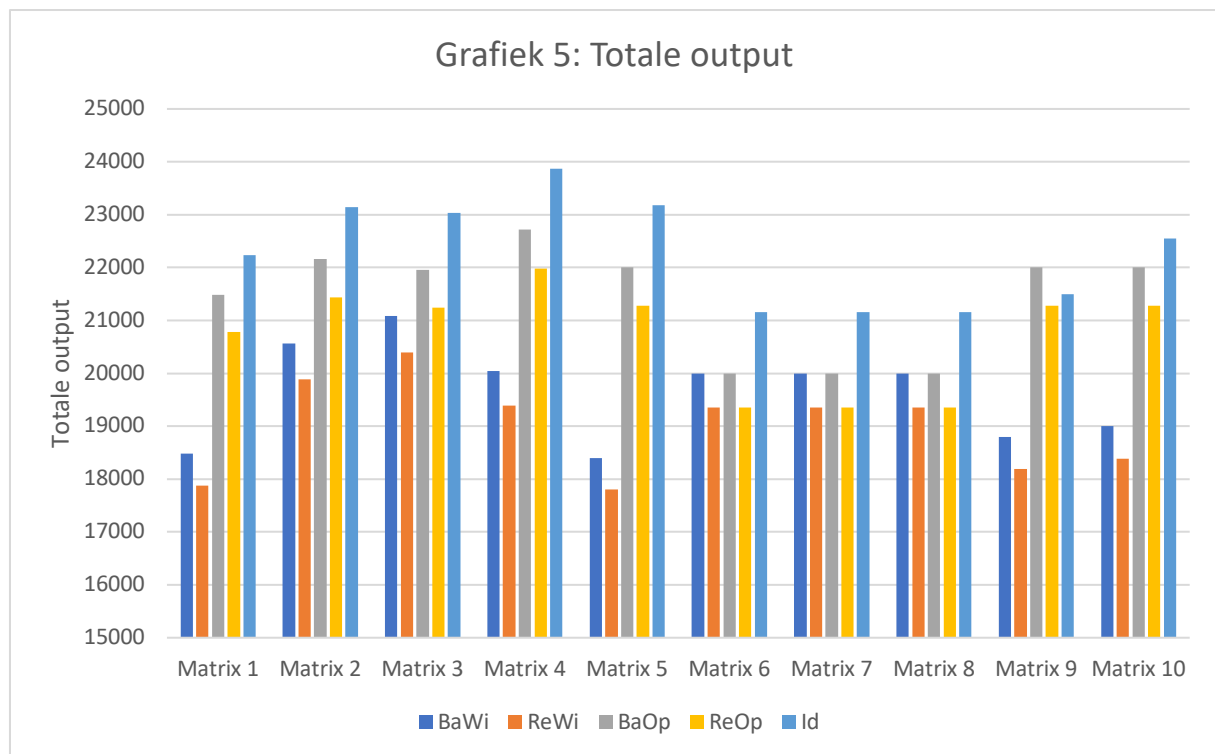
Beperking 2 zorgt ervoor dat elke taak aan slechts één werknemer toegewezen wordt. Beperking 3 zorgt ervoor dat elke werknemer slechts één taak krijgt toegewezen. Beperking 4 geeft aan dat x_{wjt} een binaire variabele is. Beperking 5 geeft aan dat d_{wjt} een integer variabele is.

De output van deze Ideale versie kan afgelezen worden in tabel 12. De waarden zijn afgerond tot gehele getallen om de tabel overzichtelijker te maken. De tabel met de exacte waarden kan geraadpleegd worden in bijlage 4.

Tabel 12: resultaten van de Ideale versie

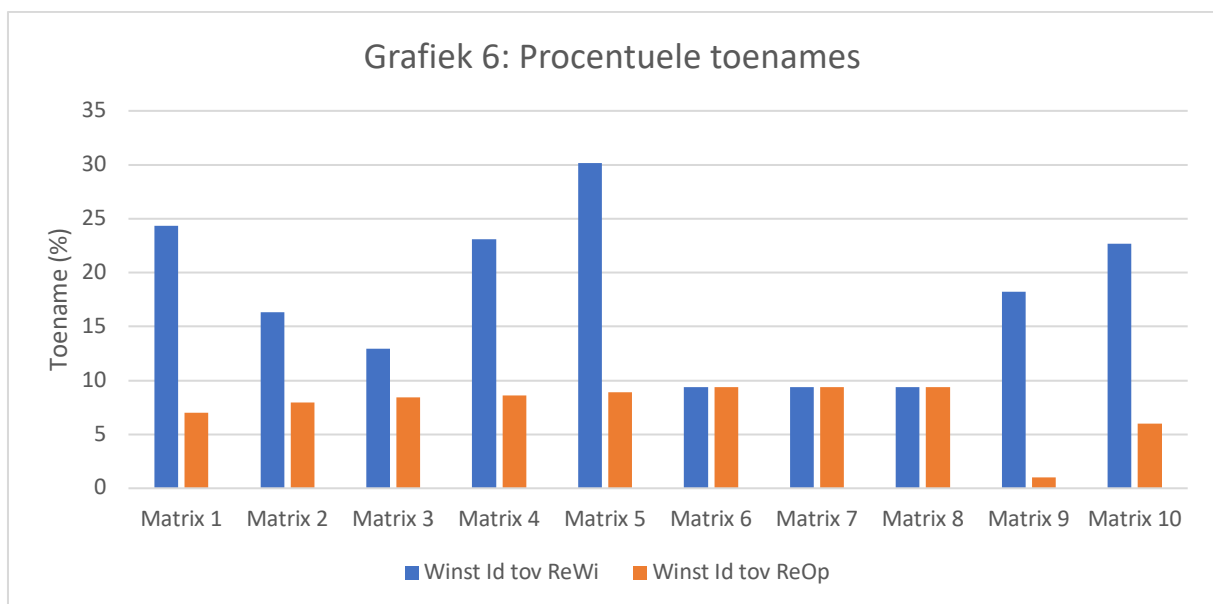
Inputmatrix	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Totale output	22231	23142	23031	23868	23174	21159	21159	21159	21499	22554

Het verschil tussen deze waarden en die van de voorgaande versies is duidelijk zichtbaar in grafiek 5.



Het valt op dat de totale output van de Ideale versie steeds hoger is dan die van de andere versies bij de willekeurig opgestelde inputmatrices. Dit is in lijn met de verwachtingen en de opzet van dit onderzoek, namelijk aantonen dat het rekening houden met individuele factoren (in dit geval vaardigheden) van werknemers in planningsmodellen (in dit geval taaktoewijzing) kan leiden tot een beter resultaat (in dit geval een hogere output). Bij de niet willekeurig opgestelde inputmatrices ligt de output enkel bij matrix negen niet hoger dan bij alle andere versies. De verklaring hiervoor komt aan bod in de volgende sectie, waar een meer uitgebreide bespreking van de niet willekeurige opgestelde inputmatrices wordt gegeven.

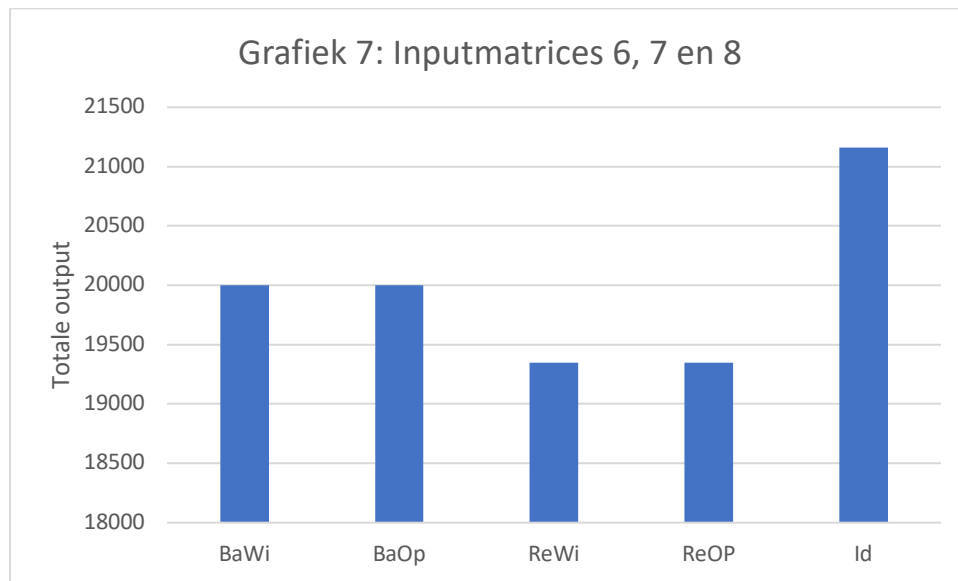
De mate waarin de output toeneemt wordt duidelijker gevisualiseerd in grafiek 6. In deze grafiek worden de procentuele toenames van de totale output grafisch weergegeven.



3.4 Bespreking resultaten niet willekeurig opgestelde inputmatrices.

Vanwege de aard van de niet willekeurig opgestelde inputmatrices — deze zijn opgesteld om extreme gevallen te simuleren — worden in deze sectie de resultaten voor de verschillende versies van het model diepgaander besproken. Dit zal de gevallen waarin geen productiviteitswinsten worden geboekt verklaren en een duidelijker beeld scheppen over de omstandigheden waarin optimalisatie en jobrotatie al dan niet voordelig kunnen zijn.

3.4.1 Inputmatrix 6



Bij inputmatrix 6 zijn alle werknemers gelijk. Hierdoor is er geen verschil tussen de resultaten van de willekeurige versies en de optimale versies (zie grafiek 7). Het is vanzelfsprekend dat er geen optimale taaktoewijzing is op basis van de individuele factoren wanneer er geen individuele verschillen aanwezig zijn. De toegenomen totale output van bij de Ideale versie is dan ook volledig toe te wijzen aan de jobrotatie.

Oorspronkelijk werd verwacht dat die zou optreden wanneer de totale opgebouwde uitputting, de totale opgebouwde leereffecten overstijgt. Vanaf dat moment zal een werknemer zijn output voor een taak namelijk onder zijn oorspronkelijke output voor die taak dalen en zal het voordelig zijn een andere werknemer aan die taak toe te wijzen. Het blijkt echter dat deze rotatie al eerder optreedt, zodat de andere taken gedurende een langere periode kunnen uitgevoerd worden. Dit leidt tot hogere totale leereffecten, een lagere totale uitputting en bijgevolg een hogere totale output. Dit is logisch aangezien het marginale leereffect in het begin het grootste is.

Concreet zal in de Ideale versie van het model voor deze inputmatrix elke werknemer drie taken uitvoeren, één gedurende 14 uren en de andere twee beide gedurende 13 uren.

3.4.2 Inputmatrix 7

Bij inputmatrix 7 verschilt het vaardigheidsniveau per werknemer, maar is dit hetzelfde voor elke taak. Hierdoor is er geen verschil tussen de resultaten van de willekeurige versies en de optimale versies. De werknemers verschillen wel onderling, maar presteren hetzelfde voor elke taak. Aangezien elke werknemer slechts één taak toegewezen krijgt en elke werknemer een taak moet toegewezen krijgen is er dus geen optimale verdeling. Net zoals bij inputmatrix 6 is de toegenomen totale output van bij de Ideale versie dan ook volledig toe te wijzen aan de jobrotatie. Ook bij deze inputmatrix zal elke werknemer 3 taken uitvoeren, één gedurende 14 uren en de andere twee beide gedurende 13 uren. De behaalde output per versie is hetzelfde als voor inputmatrix 6 (zie grafiek 7).

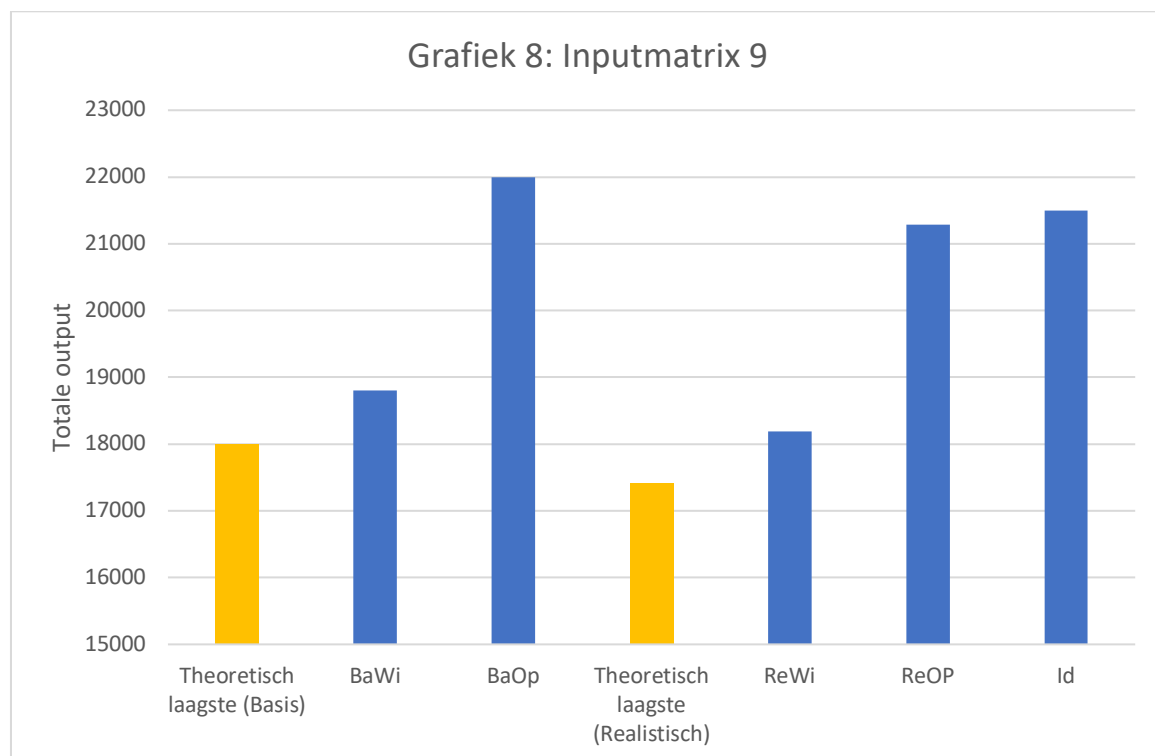
Een geoptimaliseerde taaktoewijzing is dus enkel voordelig wanneer er individuele verschillen zijn tussen de verschillende taken die werknemers kunnen uitvoeren. Dit laatst geldt enkel in het geval dat er evenveel werknemers als taken zijn en elke taak door één werknemer uitgevoerd dient te worden. Dit is in dit onderzoek overal het geval.

3.4.3 Inputmatrix 8

Bij inputmatrix 8 verschilt het vaardigheidsniveau per taak, maar is dit hetzelfde voor alle werknemers. Hierdoor is er geen verschil tussen de resultaten van de willekeurige versies en de optimale versies. De werknemers verschillen niet onderling, maar presteren hetzelfde voor elke taak. Aangezien elke taak uitgevoerd moet worden is er dus geen optimale verdeling. Net zoals bij inputmatrix 6 en inputmatrix 7 is de toegenomen totale output van bij de Ideale versie dan ook volledig toe te wijzen aan de jobrotatie. Ook bij deze inputmatrix zal elke werknemer 3 taken uitvoeren, één gedurende 14 uren en de andere twee beide gedurende 13 uren. De behaalde output per versie is hetzelfde als voor inputmatrix 6 (zie grafiek 7).

Een geoptimaliseerde taaktoewijzing is dus enkel voordelig wanneer er individuele verschillen zijn tussen de werknemers en tussen de verschillende taken die ze kunnen uitvoeren. Dit laatst geldt enkel in het geval dat er evenveel werknemers als taken zijn en elke taak door één werknemer uitgevoerd dient te worden. Dit is in dit onderzoek overal het geval.

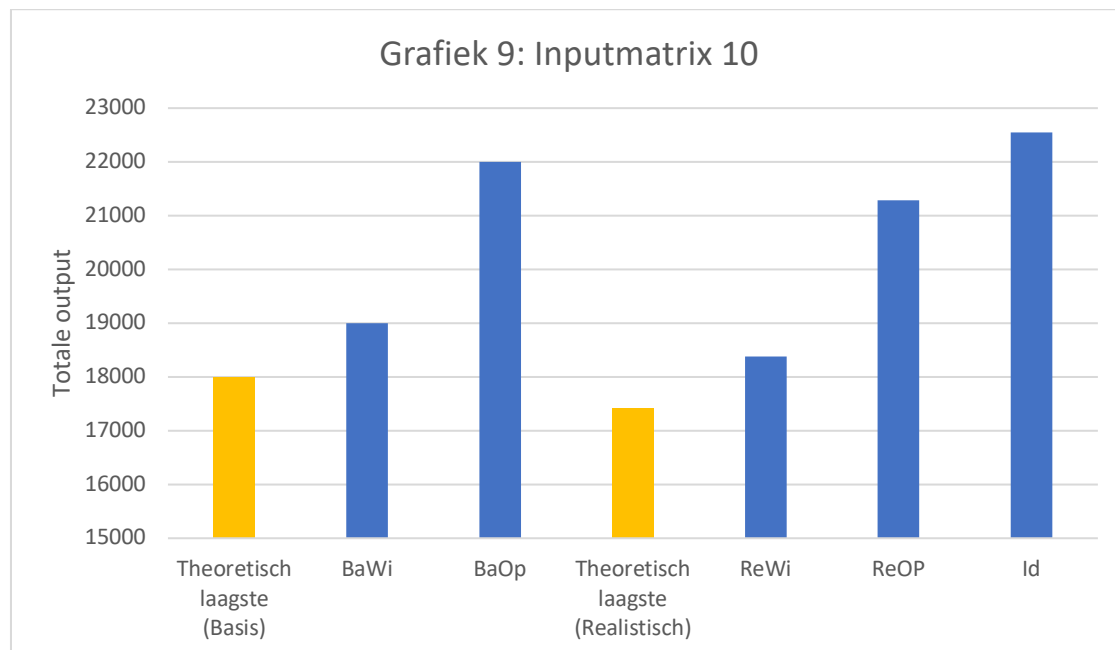
3.4.4 Inputmatrix 9



Bij inputmatrix 9 werknemer blinkt elke werknemer uit in een andere taak. Het vaardigheidsniveau voor de overige taken is gelijk. Bij een geoptimaliseerde toewijzing zal de werknemer dus gedurende de hele week enkel deze ene taak uitvoeren. De totale output ligt bij de Ideale versie lager dan bij de Basisversie Optimaal. Dit is te verklaren door de manier waarop deze matrix is opgesteld. Elke werknemer blinkt in deze versie uit in één taak en presteert beduidend slechter in alle andere taken. Hierdoor kan er met rotatie geen extra winst geboekt worden op een periode van 40 uur. Pas na 36 uren zijn optimale taak uit te voeren zal de verwachte output van een werknemer zakken onder de verwachte output van de andere taken. De totale output bij inputmatrix negen voor het Ideale model ligt wel boven die van de twee realistische modellen. Concreet zal in de Ideale versie elke werknemer gedurende 31 uren de taak uitvoeren waarin hij uitblinkt en gedurende 9 uren één andere taak. De verklaring voor het gegeven dat deze 31 uren lager ligt dan de 36 uren — waarna de verwachte output zakt onder die van de andere taken — is in lijn met de gegeven verklaring bij inputmatrix 6. Wanneer andere taken gedurende een langere periode kunnen uitgevoerd worden, leidt dit tot hogere totale leereffecten, een lagere totale uitputting en bijgevolg een hogere totale output.

Wanneer elke werknemer uitblinkt in een andere taak zal dus vooral een geoptimaliseerde toewijzing bijdragen tot een grotere output. Jobrotatie zal pas op langere termijn nuttig zijn. Het kan voor deze inputmatrix ook interessant zijn te vergelijken ten opzichte van de theoretisch laagste waarden. Dit is de output die behaald wordt wanneer nergens een werknemer wordt toegewezen aan de taak waarin hij uitblinkt. Dit maakt de winst door middel van een geoptimaliseerde toewijzing nog duidelijker.

3.4.5 Inputmatrix 10



Bij inputmatrix 10 presteert elke werknemer het beste en het minst goed in andere taken. Hierdoor zal net zoals bij inputmatrix 9 vooral een geoptimaliseerde toewijzing leiden tot een verhoogde output. Rotatie zal meer voordeel opleveren dan bij inputmatrix 9, hetgeen te verklaren valt door de kleinere verschillen tussen de verschillende taken. Hierdoor zal een werknemer sneller een hogere output kunnen behalen bij een andere taak. Concreet zal in de Ideale versie elke werknemer gedurende 23 uren zijn beste taak uitvoeren en gedurende 17 uren zijn tweede beste.

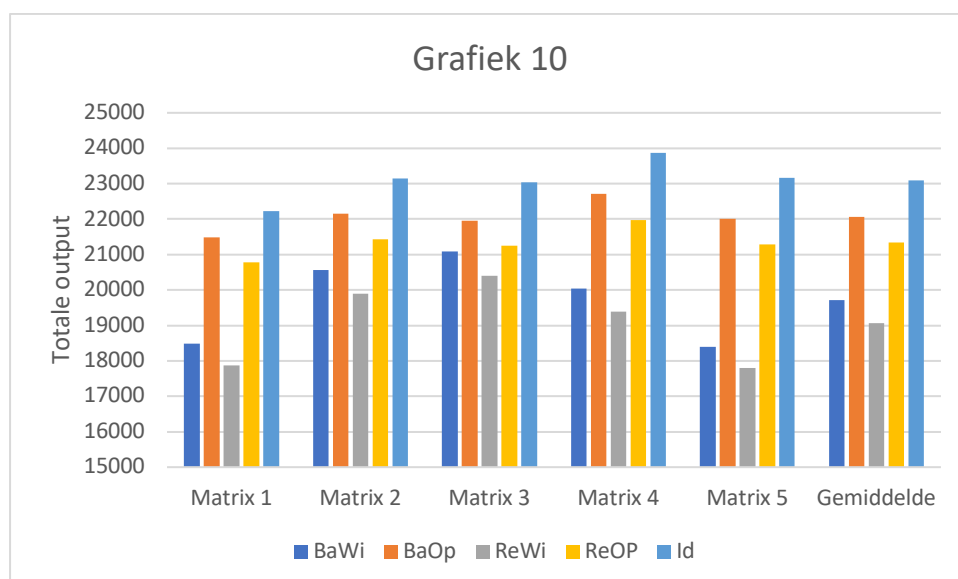
Ook bij deze inputmatrix zal dus vooral een geoptimaliseerde toewijzing bijdragen tot een grotere output. Jobrotatie zal pas op langere termijn nuttig zijn. Het kan ook voor deze inputmatrix interessant zijn te vergelijken ten opzichte van de theoretisch laagste waarden. Dit is de output die behaald wordt wanneer elke werknemer wordt toegewezen aan de taak waarin hij het slechtst presteert. Dit maakt de winst door middel van een geoptimaliseerde toewijzing nog duidelijker.

Het al dan niet voordelig zijn van rotatie hangt dus af van het verschil tussen de vaardigheidsniveaus voor de verschillende taken, de mate waarin uitputting en leereffecten optreden en de duur van de periode waarin de taken uitgevoerd worden.

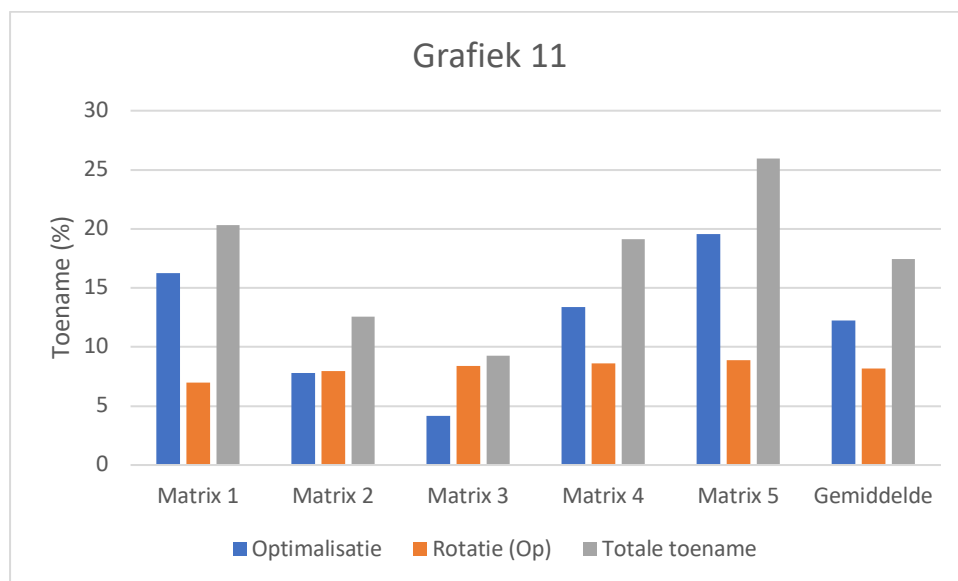
3.5 Algemene bespreking resultaten

Vanwege de aard van de niet willekeurig opgestelde inputmatrices en het gegeven dat hun resultaten reeds in de vorige sectie concreet besproken werden, zullen in deze sectie enkel de andere vijf inputmatrices aan bod komen.

De totale output per versie van het model en inputmatrix wordt nogmaals weergegeven in grafiek 10. De totale output neemt steeds toe wanneer er een geoptimaliseerd toewijzing gebruikt wordt, ten opzichte van een willekeurige toewijzing. Wanneer leereffecten en uitputting mee in rekening genomen worden, maar er geen rotatie plaatsvindt, zal de totale output dalen. Wanneer er wel rotatie mogelijk is zal de totale output het hoogst zijn.



In welke mate de verschillende versies verschillen is weergegeven in grafiek 11. De gemiddelde outputtoename door het gebruik van een geoptimaliseerde toewijzing ten opzichte van een willekeurige bedraagt 12,23%. De gemiddelde toename door het implementeren van rotatie bedraagt 8,16%. Merk op dat hierbij enkel vergeleken wordt ten opzichte van de realistische versie met een geoptimaliseerde toewijzing. De Ideale versie gebruikt namelijk ook een geoptimaliseerde toewijzing, vergelijken met een willekeurige toewijzing zou dus niet enkel de winsten vanwege rotatie weergeven. De gemiddelde totale toename van de Ideale versie ten opzichte van de willekeurige basisversie bedraagt 17,43%. Dit is lager dan de som van de toename door optimalisatie en rotatie. Dit valt te verklaren door de lagere totale output van de realistische versies ten opzichte van de basisversies. De realistische versies presteren minder goed in termen van output, maar geven een meer correct beeld van de realiteit door het opnemen van uitputting. Het verschil tussen de ideale versie en de basisversies bevat dus niet enkel de efficiëntiewinst, het neemt ook de gedaalde output mee in rekening. Dit laatste kan gezien worden als een verbetering van het model, als men kijkt in welke mate het planningsmodel de realiteit weerspiegelt. Het doel van dit onderzoek is niet om een planningsmodel te creëren met een zo hoog mogelijke theoretische output, wel het implementeren van menselijke factoren om een realistischer model te verkrijgen.



Verder kunnen er nog enkele conclusies getrokken worden uit de resultaten van dit onderzoek. Zo zal niet enkel de totale output stijgen wanneer rotatie wordt opgenomen in het model, ook de totale leereffecten nemen toe. Dit valt te verklaren door de hogere marginale leereffecten wanneer men een taak aanvangt, dan wanneer men deze reeds gedurende lange tijd uitvoert. Werknemers zullen ook voor meerdere taken hun vaardigheidsniveau verhogen. Omgekeerd evenredig met de hogere leereffecten, zal er een lagere totale uitputting zijn bij rotatie. Dit valt te verklaren door de lagere marginale uitputting wanneer men een taak aanvangt, dan wanneer men deze reeds gedurende lange tijd uitvoert. Tot slot zullen de leereffecten per taak wel dalen door rotatie. Concreet voeren de werknemers zonder rotatie telkens slechts één taak uit, met rotatie is dit gemiddeld 2,48 taken

(per werknemer) voor de willekeurig opgestelde inputmatrices en 2,6 taken (per werknemer) voor de niet willekeurige inputmatrices. De exacte gegevens per inputmatrix zijn af te lezen in tabel 13.

Tabel 13: Aantal taken per werknemer					
Matrix	Aantal taken <small>(W1, W2, W3, W4, W5)</small>	Gemiddeld	Matrix	Aantal taken <small>(W1, W2, W3, W4, W5)</small>	Gemiddeld
1	3, 3, 3, 2, 3	2,8	6	3, 3, 3, 3, 3	3
2	3, 2, 2, 3, 3	2,6	7	3, 3, 3, 3, 3	3
3	3, 2, 2, 2, 2	2,2	8	3, 3, 3, 3, 3	3
4	2, 3, 2, 3, 3	2,6	9	2, 2, 2, 2, 2	2
5	2, 2, 2, 2, 3	2,2	10	2, 2, 2, 2, 2	2
Totaal		2,48			2,6

Algemeen concluderen we dat het al dan niet toepassen van jobrotatie en de optimale duur dat dezelfde taken uitgevoerd worden dus afhangt van verschillende factoren. Hieronder vallen de mate waarin werknemers onderling verschillen (het verschil tussen hun vaardigheidsniveaus) en de mate waarin marginale leereffecten afnemen en marginale uitputting toeneemt. Ook dient men rekening te houden met de praktische haalbaarheid van jobrotatie, de eventuele kosten die hiermee gepaard gaan en de voordelen van taakspecialisatie. Deze drie factoren worden in dit onderzoek genegeerd.

4 CONCLUSIE

Dit onderzoek tracht een antwoord te bieden op de onderzoeksvraag: "Hoe kunnen vaardigheden geïntegreerd worden in planningsmodellen voor magazijnbeheer?" Het werd immers aangetoond dat het mee in rekening nemen van menselijke factoren kan leiden tot meer realistische planningsmodellen. In het literatuurdeel werden de processen binnen het magazijnbeheer kort toegelicht, waarna er verschillende menselijke factoren werden overlopen. Er werden vijf categorieën van menselijke factoren besproken, namelijk: fysieke factoren, mentale factoren, perceptuele factoren, psychosociale factoren en vaardigheden. Hierna volgde de bespreking van enkele mogelijke planningsmodellen en de planningsproblemen die zij trachten op te lossen. Uit deze bespreking volgde de conclusie dat de huidige planningsmodellen, die rekening houden met vaardigheden, nog vaak onderliggende effecten zoals motivatie en leereffecten negerden.

Vanuit de conclusie van het literatuurdeel werd het empirisch onderzoek afgebakend. Hier werd een eenvoudig wiskundig model ontwikkeld en gebruikt om enkele analyses te doen. Het model trachtte de toewijzing van taken aan werknemers te optimaliseren, rekening houdend met hun individuele vaardigheden. Verder werd er een systeem van jobrotatie geïmplementeerd om factoren zoals verveling en vermoeidheid tegen te gaan en factoren zoals motivatie hoog te houden. Hierbij bleek het belangrijk dat de afweging gemaakt moet worden tussen een toename van productiviteit door een gedaalde uitputting en het verlies van leereffecten en taakspecialisatie. Het empirisch onderzoek toont aan hoe verschillende factoren geïmplementeerd kunnen worden in een planningsprobleem en hoe deze elkaar kunnen beïnvloeden.

De algemene conclusie van dit onderzoek is dan ook dat het integreren van menselijke factoren, meer specifiek vaardigheden, in planningsmodellen kan leiden tot meer realistische modellen. Dit kan een positieve invloed hebben op zowel de productiviteit als het welzijn van de werknemers. Zoals bij veel operationele vraagstukken dient echter de afweging gemaakt te worden tussen verschillende factoren, waaronder de praktische haalbaarheid en het doel van de modellen. Er is niet altijd één optimale oplossing, eerder de mogelijkheid verschillende factoren, zoals productiviteit, welzijn, kosten, etc. tegen elkaar af te wegen, om zo bepaalde doelen te bereiken. Het toepassen van jobrotatie kan leiden tot enkele positieve effecten, waaronder: een toename van de totale vaardigheidsniveaus van werknemers, een afname van de vermoeidheid van werknemers, een afname van de verveling van werknemers en een toename van de tevredenheid van werknemers. De negatieve effecten waartoe jobrotatie eventueel kan leiden is een afname van de eenvoud van de taaktoewijzing en een afname van de effecten van taakspecialisatie.

4.1 Bijdrage voor de academische literatuur

Deze masterproef draagt bij tot de academische literatuur omtrent menselijke factoren in een logistieke context. Alhoewel er al enkele modellen bestaan om planningsproblemen op te lossen, is de hoeveelheid die dergelijke insteek hebben, eerder gering. Daarbij is dit onderzoek uniek, aangezien het zowel de individuele vaardigheden van werknemers, leereffecten en externe factoren

(motivatie, verveling, vermoeidheid) in één model combineert. Het onderzoek kent zeker nog enkele beperkingen, deze worden verder besproken in sectie 4.3.

4.2 Bijdrage voor de praktijk

Deze masterproef levert een bijdrage voor de praktijk, in die zin dat het de mogelijke meerwaarde van het integreren van vaardigheden in planningsmodellen aantoont. De gebruikte parameters en gegevens in dit onderzoek zijn eerder abstract, maar illustreren de mogelijkheden voor de praktijk. Alhoewel het niet altijd praktisch haalbaar is een volledig optimale taaktoewijzing toe te passen, kan het model toch enkele mogelijkheden tot verbetering bieden. Zo zou er een betere maximale duur dat dezelfde taak uitgevoerd mag worden door een werknemer, bepaald kunnen worden. Ook het nut van rotatie op langere termijn, hetgeen taakspecialisatie tegenwerkt, kan leiden tot een andere aanpak van taaktoewijzing in de praktijk.

Enkele van de tekortkomingen van huidige modellen, zoals aangehaald in het literatuurdeel, werden reeds aangepakt. Ook andere problemen uit de praktijk, zoals bijvoorbeeld het minimaliseren van verveling zouden met dit of gelijkaardig onderzoek als basis herbekeken kunnen worden.

4.3 Beperkingen van het onderzoek en aanbevelingen voor verder onderzoek

Dit onderzoek kent ook enkele beperkingen. Zo is het begrip vaardigheden niet erg rigoureuus afgebakend. Het definiëren van vaardigheden in de context van dit onderzoek en het afbakenen van de voorwaarden waaraan deze moeten voldoen kan dan ook het onderwerp zijn van verder onderzoek.

Daarbij zijn de gebruikte waarden voor leereffecten, vermoeidheid, motivatie, etc., eerder arbitrair bepaald, doch gebaseerd op bestaande literatuur. Verder praktisch onderzoek zou dan ook gevoerd kunnen worden om accuratere gegevens aan deze factoren toe te kennen.

Ook de assumpties die in dit onderzoek gemaakt worden, dat vergeten geen effect heeft en uitputting niet afneemt indien men terug aan een taak begint die men al eerder heeft uitgevoerd, vormen een beperking. Voor de stelling dat werknemers niet altijd aan de bovengrens van hun kunnen presteren, zoals aangehaald in sectie 2.11 werd geen concrete oplossing geboden.

Tot slot kan verder onderzoek eventueel individuele leereffecten en andere waarden van vermoeidheid voor verschillende taken trachten in kaart te brengen. Dit kan leiden tot nog realistischere modellen.

5 LITERATUURLIJST

- Aarås, A., G. Horgen, H.-H. Bjørset, O. Ro, and H. Walsøe. 2001. "Musculoskeletal, Visual and Psychosocial Stress in VDU Operators before and after Multidisciplinary Ergonomic Interventions. A 6 Years Prospective Study – Part II." *Applied Ergonomics* 32 (6): 559–571.
- Abe, D., S. Muraki, and A. Yasukouchi. 2008. "Ergonomic Effects of Load Carriage on the Upper and Lower Back on Metabolic Energy Cost of Walking." *Applied Ergonomics* 39 (3): 392–398.
- Al-Eisawi, K. W., C. J. Kerk, J. J. Congleton, A. A. Amendola, O. C. Jenkins, and W. G. Gaines. 1999. "The Effect of Handle Height and Cart Load on the Initial Hand Forces in Cart Pushing and Pulling." *Ergonomics* 42 (8): 1099–1113.
- Allwood, J. M., & Lee, W. L. (2004). The impact of job rotation on problem solving skills. *International Journal of Production Research*, 42(5), 865-881. <https://doi.org/10.1080/00207540310001631566>
- Asadayoobi, N., Jaber, M. Y., & Taghipour, S. (2021). A new learning curve with fatigue-dependent learning rate. *Applied Mathematical Modelling*, 93, 644-656. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.12.005>
- Azizi, N., Zolfaghari, S., & Liang, M. (2010). Modeling job rotation in manufacturing systems: The study of employee's boredom and skill variations. *International Journal of Production Economics*, 123(1), 69-85. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.07.010>
- Badiru, A. B. (2012). Half-life learning curves in the defense acquisition life cycle. *Defense AR Journal*, 19(3), 283.
- Baines, T. S., Asch, R., Hadfield, L., Mason, J. P., Fletcher, S., & Kay, J. M. (2005). Towards a theoretical framework for human performance modelling within manufacturing systems design. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 13(6), 486-504. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2005.01.003>
- Bakhshi, M., Hashemi, S. E., & Dezhdar, H. (2020). Applying mathematical modeling to create job rotation for improve workforce performance in semi-automatic systems. *International Journal of Research in Industrial Engineering*, 9(4), 318-327. <https://doi.org/10.22105/rirej.2020.243223.1140>
- Barker, L. M., & Nussbaum, M. A. (2011). Fatigue, performance and the work environment: A survey of registered nurses: Fatigue, performance and the work environment. *Journal of Advanced Nursing*, 67(6), 1370-1382. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2648.2010.05597.x>

- Bartholdi, J. J., Eisenstein, D. D., & Lim, Y. F. (2006). Bucket brigades on in-tree assembly networks. *European Journal of Operational Research*, 168(3), 870-879. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.07.034>
- Bartholdi, J. J., III, & Eisenstein, D. D. (2005). Using bucket brigades to migrate from craft manufacturing to assembly lines. *Manufacturing & Service Operations Management*, 7(2), 121-129. <https://doi.org/10.1287/msom.1040.0059>
- Bechtold, S. E., Janaro, R. E., & Sumners, D. W. L. (1984). Maximization of labor productivity through optimal rest-break schedules. *Management Science*, 30(12), 1442-1458. <https://doi.org/10.1287/mnsc.30.12.1442>
- Bendoly, E., & Prietula, M. (2008). In "the zone": The role of evolving skill and transitional workload on motivation and realized performance in operational tasks. *International Journal of Operations & Production Management*, 28(12), 1130-1152. <https://doi.org/10.1108/01443570810919341>
- Bera, K., Shukla, A., & Bapi, R. S. (2021). Cognitive and motor learning in internally-guided motor skills. *Frontiers in Psychology*, 12, 604323-604323. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.604323>
- Biddle, J. E., & Hamermesh, D. S. (1998). Beauty, productivity, and discrimination: Lawyers' looks and lucre. *Journal of Labor Economics*, 16(1), 172-201. <https://doi.org/10.1086/209886>
- Bishu, R. R., Donohue, B., & Murphy, P. (1992). Cognitive ergonomics of a mail order filling company: Part 2—influence of shelf coding and address information on acquisition time. *Applied ergonomics*, 23(2), 115-120.
- Boenzi, F., Digiesi, S., Mossa, G., Mummolo, G., & Romano, V. A. (2015). Modelling workforce aging in job rotation problems. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 604-609.
- Boudreau, J., Hopp, W., McClain, J. O., & Thomas, L. J. (2003). On the interface between operations and human resources management. *Manufacturing & Service Operations Management*, 5(3), 179-202. <https://doi.org/10.1287/msom.5.3.179.16032>
- Brings, J., Daun, M., Kempe, M., & Weyer, T. (2018). On different search methods for systematic literature reviews and maps: Experiences from a literature search on validation and verification of emergent behavior. Paper presented at the, 137700 35-45. <https://doi.org/10.1145/3210459.3210463>

- Brynzér, H., & Johansson, M. I. (1996). Storage location assignment: Using the product structure to reduce order picking times. *International Journal of Production Economics*, 46(1), 595-603. [https://doi.org/10.1016/0925-5273\(94\)00091-3](https://doi.org/10.1016/0925-5273(94)00091-3)
- Buisman, M., Allen, J., & Fouarge, D. (2013). PIAAC: Kernvaardigheden voor werk en leven. *Journal of Health Economics*, 31(3), 490-501.
- Burinskiene, A. (2010). Order picking process at warehouses. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 6(2), 162-178.
- Calzavara, M., Persona, A., Sgarbossa, F., & Visentin, V. (2019). A model for rest allowance estimation to improve tasks assignment to operators. *International Journal of Production Research*, 57(3), 948-962. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1497816>
- Chuang, Y., Lee, H., & Lai, Y. (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>
- Comeos. (2020). E-commerce survey 2020. <https://www.comeos.be/research/376488/E-commercestudie-2020>
- Cordeau, J., Laporte, G., Pasin, F., & Ropke, S. (2010). Scheduling technicians and tasks in a telecommunications company. *Journal of Scheduling*, 13(4), 393-409. <https://doi.org/10.1007/s10951-010-0188-7>
- Corominas, A., Olivella, J., & Pastor, R. (2010). A model for the assignment of a set of tasks when work performance depends on experience of all tasks involved. *International Journal of Production Economics*, 126(2), 335-340. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.04.012>
- Dagenais, S., Caro, J., & Haldeman, S. (2008). A systematic review of low back pain cost of illness studies in the united states and internationally. *The Spine Journal*, 8(1), 8-20. <https://doi.org/10.1016/j.spinee.2007.10.005>
- Davis, K. G., and W. S. Marras. 2000. "Assessment of the Relationship between Box Weight and Trunk Kinematics: Does a Reduction in Box Weight Necessarily Correspond to a Decrease in Spinal Loading?" *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 42 (2): 195-208.
- 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 Koster, R., D. Stam, and B. M. Balk. (2011). "Accidents Happen: The Influence of Safety-Specific Transformational Leadership, Safety Consciousness, and Hazard Reducing Systems on Warehouse Accidents." *Journal of Operations Management* 29 (7–8): 753–765.
- Diego-Mas, J. A. (2020). Designing cyclic job rotations to reduce the exposure to ergonomics risk factors. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(3), 1073. doi:10.3390/ijerph17031073
- Digiesi, S., Kock, A. A. A., Mummolo, G., & Rooda, J. E. (2009). The effect of dynamic worker behavior on flow line performance. *International Journal of Production Economics*, 120(2), 368-377. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.12.012>
- Elkosantini, S., & Gien, D. (2009). Integration of human behavioural aspects in a dynamic model for a manufacturing system. *International Journal of Production Research*, 47(10), 2601-2623. <https://doi.org/10.1080/00207540701663490>
- Eurostat. (2022). E-commerce statistics for individuals. <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/pdfscache/14386.pdf>
- Finnsgård, C., C. Wänström, L. Medbo, and W. P. Neumann. 2011. "Impact of Materials Exposure on Assembly Workstation Performance." *International Journal of Production Research* 49 (24): 7253–7274.
- Gademann, N., & Velde, S. (2005). Order batching to minimize total travel time in a parallel-aisle warehouse. *IIE Transactions*, 37(1), 63-75. <https://doi.org/10.1080/07408170590516917>
- Givi, Z. S., Jaber, M. Y., & Neumann, W. P. (2015). Modelling worker reliability with learning and fatigue. *Applied Mathematical Modelling*, 39(17), 5186-5199. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.03.038>
- Glock, C. H., Grosse, E. H., Kim, T., Neumann, W. P., & Sobhani, A. (2019). An integrated cost and worker fatigue evaluation model of a packaging process. *International Journal of Production Economics*, 207, 107-124. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.09.022>
- Goetschalckx, M., & Ashayeri, J. (1989). Classification and design of order picking. *Logistics World*.
- Gong, Y., & De Koster, R. (2008). A polling-based dynamic order picking system for online retailers. *IIE Transactions*, 40(11), 1070–1082. <https://doi.org/10.1080/07408170802167670>
- Grandjean, E. (1979). Fatigue in industry. *British Journal of Industrial Medicine*, 36(3), 175-186. <https://doi.org/10.1136/oem.36.3.175>

- Granotto, G. F., Sgarbossa, F., Glock, C. H., & Grosse, E. H. (2019). The effect of worker fatigue on the performance of a bucket brigade order picking system. *Ifac Papersonline*, 52(13), 2195-2200. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.531>
- Green, F. (2011). *What is Skill?: An Inter-Disciplinary Synthesis*. London: Centre for Learning and Life Chances in Knowledge Economies and Societies.
- Grosse, E. H., & Glock, C. H. (2013). An experimental investigation of learning effects in order picking systems. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 24(6), 850-872. <https://doi.org/10.1108/JMTM-03-2012-0036>
- Grosse, E. H., Glock, C. H., & Jaber, M. Y. (2013). The effect of worker learning and forgetting on storage reassignment decisions in order picking systems. *Computers & Industrial Engineering*, 66(4), 653-662. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.09.013>
- 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>
- Grosse, E. H., Glock, C. H., Jaber, M. Y., & Neumann, W. P. (2015). Incorporating human factors in order picking planning models: Framework and research opportunities. *International Journal of Production Research*, 53(3), 695-717. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.919424>
- Grugulis, I., & Stoyanova, D. (2011). Skill and performance. *British Journal of Industrial Relations*, 49(3), 515-536. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8543.2010.00779.x>
- 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>
- Hanushek, E. A., Schwerdt, G., Wiederhold, S., & Woessmann, L. (2015). Returns to skills around the world: Evidence from PIAAC. *European Economic Review*, 73(73), 103-130. <https://doi.org/10.1016/j.euroecorev.2014.10.006>
- Hod, S. (2022). Quantitative description of cognitive fatigue in repetitive monotonous tasks. *Physica A*, 608, <https://doi.org/10.1016/j.physa.2022.128270>
- Holland, C. (2019). The changing world of warehousing, distribution and fulfillment. *Lehigh Valley Business*. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.07.009>
- Hong, Soondo. 2019. "A performance evaluation of bucket brigade order picking systems: Analytical and simulation approaches." *Computers & Industrial Engineering* 135: 120–131.

- Jaber, M. Y., Givi, Z. S., & Neumann, W. P. (2013). Incorporating human fatigue and recovery into the learning–forgetting process. *Applied Mathematical Modelling*, 37(12-13), 7287-7299. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.02.028>
- Jensen, J. B., & Kletzer, L. G. (2010). Measuring tradable services and the task content of offshorable services jobs. In *Labor in the new economy* (pp. 309-335). *University of Chicago Press*.
- Jeon, I. S., & Jeong, B. Y. (2016). Effect of job rotation types on productivity, accident rate, and satisfaction in the automotive assembly line workers. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 26(4), 455-462. <https://doi.org/10.1002/hfm.20667>
- Jewkes, E., Lee, C., & Vickson, R. (2004). Product location, allocation and server home base location for an order picking line with multiple servers. *Computers & Operations Research*, 31(4), 623-636. [https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(03\)00035-2](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(03)00035-2)
- Jones, G., Hocine, M., Salomon, J., Dab, W., & Temime, L. (2015). Demographic and occupational predictors of stress and fatigue in french intensive-care registered nurses and nurses' aides: A cross-sectional study. *International Journal of Nursing Studies*, 52(1), 250-259. <https://doi.org/10.1016/j.ijnurstu.2014.07.015>
- Jonsson, B. (1988). Electromyographic studies of job rotation. *Scandinavian journal of work, environment & health*, 14, 108-109.
- Juran, D. C., & Schruben, L. W. (2004). Using worker personality and demographic information to improve system performance prediction. *Journal of Operations Management*, 22(4), 355-367. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2004.05.003>
- Kadir, B. A., Broberg, O., & Conceição, C. S. d. (2019). Current research and future perspectives on human factors and ergonomics in industry 4.0. *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106004. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106004>
- Kotzab, H., Teller, C., Bourlakis, M., & Wünsche, S. (2018). Key competences of logistics and SCM professionals – the lifelong learning perspective. *Supply Chain Management*, 23(1), 50-64. <https://doi.org/10.1108/SCM-02-2017-0079>
- Kuijjer, P. P. F. M., van der Beek, Allard J., van Dieën, J. H., Visser, B., & Frings-Dresen, M. H. W. (2005). Effect of job rotation on need for recovery, musculoskeletal complaints, and sick leave due to musculoskeletal complaints: A prospective study among refuse collectors. *American Journal of Industrial Medicine*, 47(5), 394-402. <https://doi.org/10.1002/ajim.20159>

- Kulak, O., Y. Sahin, and M. E. Taner. 2012. "Joint Order Batching and Picker Routing in Single and Multiple-Cross-Aisle Warehouses using Cluster-Based Tabu Search Algorithms." *Flexible Services and Manufacturing Journal* 24 (1): 52–80.
- Larco Martinelli, J. (2010). Incorporating Worker-Specific Factors in Operations Management Models (No. EPS-2010-217-LIS).
- Li, J., Huang, R., & Dai, J. B. (2017). Joint optimisation of order batching and picker routing in the online retailer's warehouse in china. *International Journal of Production Research*, 55(2), 447-461. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1187313>
- Lodree, E. J., Geiger, C. D., & Jiang, X. (2009). Taxonomy for integrating scheduling theory and human factors: Review and research opportunities. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39(1), 39-51. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2008.05.001>
- Lohaus, D., & Habermann, W. (2019). Presenteeism: A review and research directions. *Human Resource Management Review*, 29(1), 43-58. <https://doi.org/10.1016/j.hrmr.2018.02.010>
- Marras, W. S., Davis, K. G., Kirking, B. C., & Bertsche, P. K. (1998). Low back disorder risk and spinal loading during patient transfer. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 2, 901.
- Matusiak, M., de Koster, R., & Saarinen, J. (2017). Utilizing individual picker skills to improve order batching in a warehouse. *European Journal of Operational Research*, 263(3), 888-899. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.05.002>
- McDonald, T., Ellis, K. P., Van Aken, E. M., & Patrick Koelling, C. (2009). Development and application of a worker assignment model to evaluate a lean manufacturing cell. *International Journal of Production Research*, 47(9), 2427-2447. <https://doi.org/10.1080/00207540701570174>
- McIntosh, S., & Vignoles, A. (2001). Measuring and assessing the impact of basic skills on labour market outcomes. *Oxford Economic Papers*, 53(3), 453-481.
- Michel, R. (2016). 2016 Warehouse/DC operations survey: Ready to confront complexity. *Supply Chain Management Review*, 20(6), S52-S54,S56,S58-S59. Retrieved from <https://www.proquest.com/trade-journals/2016-warehouse-dc-operations-survey-ready/docview/1870957402/se-2?accountid=27889>
- Mossa, G., Boenzi, F., Digiesi, S., Mummolo, G., & Romano, V. A. (2016). Productivity and ergonomic risk in human based production systems: A job-rotation scheduling model. *International Journal of Production Economics*, 171, 471-477. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.06.017>

- Mou, S. (2022). Integrated order picking and multi-skilled picker scheduling in omni-channel retail stores. *Mathematics* (Basel), 10(9), 1484. <https://doi.org/10.3390/math10091484>
- Norman, B. A., Tharmmaphornphilas, W., Needy, K. L., Bidanda, B., & Warner, R. C. (2002). Worker assignment in cellular manufacturing considering technical and human skills. *International Journal of Production Research*, 40(6), 1479-1492. <https://doi.org/10.1080/00207540110118082>
- Othman, M., Gouw, G. J., & Bhuiyan, N. (2012). Workforce scheduling: A new model incorporating human factors. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 5(2), 259-284. <https://doi.org/10.3926/jiem.451>
- Payne, J. (2000). The unbearable lightness of skill: the changing meaning of skill in UK policy discourses and some implications for education and training. *Journal of Education Policy*, 15(3), 353-369.
- Perez, J., de Looze, M. P., Bosch, T., & Neumann, W. P. (2014). Discrete event simulation as an ergonomic tool to predict workload exposures during systems design. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 44(2), 298-306. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2013.04.007>
- Petersen, C. G., Siu, C., & Heiser, D. R. (2005). Improving order picking performance utilizing slotting and golden zone storage. *International Journal of Operations & Production Management*, 25(10), 997-1012. <https://doi.org/10.1108/01443570510619491>
- Petersen, C. G., and G. Aase. (2004). "A Comparison of Picking, Storage, and Routing Policies in Manual Order Picking." *International Journal of Production Economics* 92 (1): 11-19.
- Petersen, C. G. (2002). Considerations in order picking zone configuration. *International Journal of Operations & Production Management*, 22(7), 793-805. <https://doi.org/10.1108/01443570210433553>
- Potvin, J. R. (2012). Predicting maximum acceptable efforts for repetitive tasks: an equation based on duty cycle. *Human factors*, 54(2), 175-188.
- Rasmussen, J. (1983). Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-13(3), 257-266. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1983.6313160>
- Rinaldi, M., Fera, M., Bottani, E., & Grosse, E. H. (2022). Workforce scheduling incorporating worker skills and ergonomic constraints. *Computers & Industrial Engineering*, 168, 108107. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108107>

- Rissén, D., Melin, B., Sandsjö, L., Dohns, I., & Lundberg, U. (2002). Psychophysiological stress reactions, trapezius muscle activity, and neck and shoulder pain among female cashiers before and after introduction of job rotation. *Work and Stress*, 16(2), 127-137. <https://doi.org/10.1080/02678370210141530>
- Sadiq, M., Landers, T. L., & Taylor, G. D. (1996). An Assignment Algorithm for Dynamic Picking Systems. *IIE Transactions*, 28(8), 607-616. <https://doi.org/10.1080/15458830.1996.11770706>
- Schmidt, G., & Wilhelm, W. E. (2000). Strategic, tactical and operational decisions in multi-national logistics networks: A review and discussion of modelling issues. *International Journal of Production Research*, 38(7), 1501-1523. <https://doi.org/10.1080/002075400188690>
- Schneider, E., & Irastorza, X. (2010). Work-related musculoskeletal disorders in the EU. *European Agency for Safety and Health at Work*, Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Schneider, S., Grant, K. A., Habes, D. J., & Bertsche, P. K. (1997). Ergonomics: Lifting hazards at a cabinet manufacturing company: Evaluation and recommended controls. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 12(4), 253-258.
- Scholz, A., & Wäscher, G. (2017). Order batching and picker routing in manual order picking systems: The benefits of integrated routing. *Central European Journal of Operations Research*, 25(2), 491-520. <https://doi.org/10.1007/s10100-017-0467-x>
- Sgarbossa, F., Grosse, E. H., Neumann, W. P., Battini, D., & Glock, C. H. (2020). Human factors in production and logistics systems of the future. *Annual Reviews in Control*, 49, 295-305. doi:10.1016/j.arcontrol.2020.04.007
- Sievertsen, H. H., Gino, F., & Piovesan, M. (2016). Cognitive fatigue influences students' performance on standardized tests. *Proceedings of the National Academy of Sciences - PNAS*, 113(10), 2621-2624. <https://doi.org/10.1073/pnas.1516947113>
- Statista. (2020). E-commerce share of total retail sales. Statista. <https://www.statista.com/statistics/534123/e-commerce-share-of-retail-sales-worldwide/>
- Stinson, M. (2014). Learning curves of temporary workers in manual order picking activities. *Logistics Journal: Proceedings*, 2014(01).
- Tompkins, J. A., White, J. A., Bozer, Y. A., & Tanchoco, J. M. A. (2010). Facilities planning. *John Wiley & Sons*.

- van Gils, T., Ramaekers, K., Braekers, K., Depaire, B., & Caris, A. (2018). Increasing order picking efficiency by integrating storage, batching, zone picking, and routing policy decisions. *International Journal of Production Economics*, 197, 243–261. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.11.021>
- van Zelst, S., van Donselaar, K., van Woensel, T., Broekmeulen, R., & Fransoo, J. (2009). Logistics drivers for shelf stacking in grocery retail stores: Potential for efficiency-improvement. *International Journal of Production Economics*, 121(2), 620-632. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.06.010>
- Vijayakumar, V., Sgarbossa, F., Neumann, W. P., & Sobhani, A. (2022). Framework for incorporating human factors into production and logistics systems. *International Journal of Production Research*, 60(2), 402-419. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1983225>
- Warner, R. C., Needy, K. L., & Bidanda, B. (1997). Worker assignment in implementing manufacturing cells. *Proceedings of the IERC*, 245.
- Weaver, K., Baumann, H., Starner, T., Iben, H., Lawo, M., & ACM. (2010). An empirical task analysis of warehouse order picking using head-mounted displays. Paper presented at the , 3 1695-1704. <https://doi.org/10.1145/1753326.1753580>
- Winkelhaus, S., Sgarbossa, F., Calzavara, M., & Grosse, E. H. (2018). The effects of human fatigue on learning in order picking - an explorative experimental investigation.(). St. Louis: Federal Reserve Bank of St Louis.
- Winstein, C. J., Pohl, P. S., Cardinale, C., Green, A., Scholtz, L., & Waters, C. S. (1996). Learning a partial-weight-bearing skill: Effectiveness of two forms of feedback. *Physical Therapy*, 76(9), 985-993. <https://doi.org/10.1093/ptj/76.9.985>

6 BIJLAGEN

6.1 Bijlage 1

De willekeurige inputmatrices werden opgesteld in Microsoft Excel met behulp van de aselect.matrix functie. Deze functie genereert een matrix van X aantal rijen en Y aantal kolommen, met waarden tussen Z en W, allemaal gehele getallen. Dit door de functie te definiëren als aselect.matrix(X;Y;Z;X;WAAR). Concreet voor dit onderzoek werd dus de formule als aselect.matrix(5;5;80;120;WAAR) ingevuld.

6.2 Bijlage 2

Deze tabel geeft de verdelingen weer voor de Basisversie Optimaal, de toegewezen taken per werknemer zijn onderstreept.

Matrix	Werknemers	Taak 1	Taak 2	Taak 3	Taak 4	Taak 5
1	Werknemer 1	<u>117</u>	103	93	92	99
	Werknemer 2	102	<u>105</u>	113	103	88
	Werknemer 3	82	92	86	<u>105</u>	80
	Werknemer 4	101	101	<u>114</u>	102	82
	Werknemer 5	94	90	116	84	<u>96</u>
2	Werknemer 1	89	87	98	<u>83</u>	106
	Werknemer 2	99	97	<u>116</u>	93	115
	Werknemer 3	<u>120</u>	117	88	91	114
	Werknemer 4	80	<u>117</u>	95	89	114
	Werknemer 5	105	85	107	83	<u>118</u>
3	Werknemer 1	<u>90</u>	96	115	106	90
	Werknemer 2	83	81	91	85	<u>117</u>
	Werknemer 3	90	108	118	<u>120</u>	90
	Werknemer 4	96	<u>106</u>	120	108	87
	Werknemer 5	88	96	<u>116</u>	81	108
4	Werknemer 1	119	<u>112</u>	87	106	115
	Werknemer 2	104	94	95	<u>106</u>	96
	Werknemer 3	85	80	<u>115</u>	117	94
	Werknemer 4	106	103	118	116	<u>115</u>

	Werknemer 5	<u>120</u>	101	113	107	104
	Werknemer 1	94	92	<u>95</u>	88	85
	Werknemer 2	100	96	86	<u>114</u>	112
5	Werknemer 3	106	88	107	99	<u>117</u>
	Werknemer 4	<u>110</u>	97	92	103	87
	Werknemer 5	82	<u>114</u>	85	116	86
	Werknemer 1	<u>100</u>	100	100	100	100
	Werknemer 2	100	<u>100</u>	100	100	100
6	Werknemer 3	100	100	<u>100</u>	100	100
	Werknemer 4	100	100	100	<u>100</u>	100
	Werknemer 5	100	100	100	100	<u>100</u>
	Werknemer 1	<u>110</u>	110	110	110	110
	Werknemer 2	105	<u>105</u>	105	105	105
7	Werknemer 3	100	100	<u>100</u>	100	100
	Werknemer 4	95	95	95	<u>95</u>	95
	Werknemer 5	90	90	90	90	<u>90</u>
	Werknemer 1	<u>110</u>	105	100	95	90
	Werknemer 2	110	<u>105</u>	100	95	90
8	Werknemer 3	110	105	<u>100</u>	95	90
	Werknemer 4	110	105	100	<u>95</u>	90
	Werknemer 5	110	105	100	95	<u>90</u>
	Werknemer 1	<u>110</u>	90	90	90	90
	Werknemer 2	90	<u>110</u>	90	90	90
9	Werknemer 3	90	90	<u>110</u>	90	90
	Werknemer 4	90	90	90	<u>110</u>	90
	Werknemer 5	90	90	90	90	<u>110</u>
	Werknemer 1	<u>110</u>	105	100	95	90
	Werknemer 2	90	<u>110</u>	105	100	95
10	Werknemer 3	95	90	<u>110</u>	105	100
	Werknemer 4	100	95	90	<u>110</u>	105
	Werknemer 5	105	100	95	90	<u>110</u>

6.3 Bijlage 3

Tabel 11: resultaten van de realistische versies					
Inputmatrix	1	2	3	4	5
<i>ReWi</i>					
Totale output	17878,2108	19890,477	20393,5435	19387,4104	17800,816
Gemiddelde output	3575,64216	3978,09539	4078,7087	3877,48209	3560,16319
<i>ReOp</i>					
Totale output	20780,5178	21438,374	21244,8869	21980,138	21283,5843
Gemiddelde output	4156,10355	4287,6748	4248,97737	4396,02759	4256,71686

Tabel 11: resultaten van de realistische versies					
Inputmatrix	6	7	8	9	10
<i>ReWi</i>					
Totale output	19348,713	19348,713	19348,713	18187,7902	18381,2774
Gemiddelde output	3869,7426	3869,7426	3869,7426	3637,55804	3676,25547
<i>ReOp</i>					
Totale output	19348,713	19348,713	19348,713	21283,5843	21283,5843
Gemiddelde output	3869,7426	3869,7426	3869,7426	4256,71686	4256,71686

6.4 Bijlage 4

Tabel 12: resultaten van de Ideale versie					
Inputmatrix	1	2	3	4	5
Totale output	22230,6648	23141,6961	23031,4012	23868,0782	23174,2413
Inputmatrix	6	7	8	9	10
Totale output	21158,8371	21158,837	21158,837	21499,3882	22553,6455