

Artificial Intelligence voor Duurzamere en Efficiëntere Logistiek

Dr. Raymond Hoogendoorn





Hogeschool Rotterdam Uitgeverij

1e druk, mei 2023

Dit boek is een uitgave van Hogeschool Rotterdam Uitgeverij
Postbus 25035
3001 HA Rotterdam

© Dr. Raymond Hoogendoorn

Ontwerp
Jargo Design

Omslagfoto en beelden binnenwerk: Shutterstock

ISBN: 9789493012431



9 789493 012431 >

De copyrights van de afbeeldingen (figuren en foto's) berusten bij Hogeschool Rotterdam en de makers tenzij anders vermeld.

Deze publicatie valt onder een Creative Commons Naamsvermelding-Niet Commercieel-GelijkDelen 4.0 Internationaal-licentie.



Artificial Intelligence voor Duurzamere en Efficiëntere Logistiek

Dr. Raymond Hoogendoorn

Lector Artificial Intelligence voor de Logistiek

Rotterdam, 9 mei 2023

Inhoudsopgave

1	Mogelijkheden voor duurzaamheid in de logistiek	7
1.1	Belangrijke ontwikkelingen in de logistiek	7
1.2	Verduurzaming en beperking van CO ₂ -uitstoot door de logistieke sector	9
1.3	Meer efficiëntie met AI?	11
1.4	Opdracht van het lectoraat	13
2	Optimalisatie van logistieke processen	15
2.1	Inleiding	15
2.2	Optimalisatie van de locaties van warehouses en hubs	17
2.3	Optimalisatie van distributieroutes	20
2.4	Betere voorspelling van de vraag naar transport	23
2.5	Smart warehousing	26
2.6	Predictive maintenance	29
3	Naar duurzame logistiek met AI	35
3.1	Inleiding	35
3.2	Onderzoek naar optimalisatie van de locatie van warehouses en hubs met AI	38
3.3	Onderzoek naar optimalisatie van distributieroutes met AI en cyber-fysieke systemen	40
3.4	Onderzoek naar het betere voorspelling van de transportvraag met AI	41
3.5	Onderzoek naar smart warehousing met AI	43
3.6	Onderzoek naar AI-gestuurd predictive maintenance	45
4	Verbinding met het onderwijs	49
4.1	AI- en logistieke experts van de toekomst	49
4.2	AI en logistiek in de opleidingen op Hogeschool Rotterdam	50
4.3	Verbinding met onderwijs en onderzoek	51
4.4	DataLab als vehikel voor verbinding	52
5	Samenvatting	55
6	Summary	59
7	Literatuur	63
8	Dankwoord	69
9	Over de lector	71
	Eerdere uitgaven	72

Mogelijkheden voor duurzaamheid in de logistiek

1.1 Belangrijke ontwikkelingen in de logistiek

Nederland bekleedt internationaal een topositie in het afhandelen van goederenstromen. Daarom vestigen Europese distributiecentra van Amerikaanse en Aziatische bedrijven zich graag in ons land. Om deze positie te kunnen behouden, moet het Nederlandse bedrijfsleven echter anticiperen op zowel voorspelbare als minder voorspelbare veranderingen.

Het belang van de logistieke sector voor de Nederlandse economie is groot. De logistieke sector heeft namelijk een toegevoegde waarde van 30 miljard euro (6% van het BBP) en zorgt voor ongeveer 617.000 arbeidsplaatsen. Het verliezen van de topositie zou dus zowel grote financiële als sociaaleconomische gevolgen hebben.

Mondiale ontwikkelingen, zoals de opkomst van de *Emerging 7* ofwel E7-landen (China, India, de Verenigde Staten, Indonesië, Turkije, Brazilië, Rusland, Japan, Duitsland en Egypte), klimaatverandering en de toenemende nationalisering van natuurlijke hulpbronnen leiden tot kansen en uitdagingen voor de Nederlandse logistieke sector. Het is niet meer zo vanzelfsprekend dat Nederland de bestaande goederenstromen zal kunnen en mogen verwerken. Tegelijkertijd ontstaan er nieuwe kansen binnen een nieuwe generatie logistiek. Deze nieuwe generatie kenmerkt zich door complexe netwerken (zoals communicatienetwerken) en een verregaande digitalisering. Nederland heeft nu de mogelijkheid om met zijn virtuele infrastructuur en dienstensector deze kansen te benutten en daarmee zijn logistieke concurrentiepositie te behouden of zelfs te versterken.

Alle nieuwe technologische mogelijkheden kunnen veel betekenen voor de logistieke sector. Zo heeft digitalisering de drempel voor kleine spelers verlaagd om tot de markt toe te treden en vormt hiermee een belangrijke voedingsbodem voor innovatie. Mobiele telefonie en smartphones hebben bijvoorbeeld gezorgd voor een constante toegang tot informatie en kennisuitwisseling. Hierdoor hebben kleinere partijen toegang tot de markt zonder dat zij direct grote investeringen hoeven te doen.

De digitalisering zorgt voor een samensmelting van de fysieke en virtuele wereld en dat proces zal waarschijnlijk blijven doorgaan. Dat gebeurt bijvoorbeeld bij het gebruik van *digital twins* en *augmented reality*. Een *digital twin* is een virtuele kopie van een object of proces. Bedrijven en onderzoekers kunnen daarmee simulaties uitvoeren tijdens het

ontwerpen van een object of proces, om voorspellingen te doen over bijvoorbeeld onderhoud, kosten of snelheid. Een voorbeeld van een *digital twin* in de logistiek is een digitale kopie van een motor van een schip. Deze kopie stelt bijvoorbeeld een organisatie in staat om slijtage van onderdelen van de motor te kunnen voorspellen.

Augmented reality is een versie van een bestaande situatie waaraan digitaal elementen zijn toegevoegd, zoals beelden, geluiden en andere sensorische stimuli (zoals in de AR-bril van Google Glass). Een voorbeeld van het gebruik van *augmented reality* is het inzetten van deze techniek om op afstand operators die reparaties aan een onderdeel van een schip moeten uitvoeren te ondersteunen en te adviseren. Zij zien dan bijvoorbeeld door een AR-bril welke onderdelen van bijvoorbeeld een motor dienen te worden gerepareerd.



Transport van olie in de Rotterdamse haven

Naast de genoemde internationale ontwikkelingen in de logistieke sector zijn er ook andere ontwikkelingen die de Nederlandse logistieke bedrijven dwingen om te digitaliseren als ze financieel gezond willen blijven. Neem de steeds groter wordende druk op deze bedrijven om te verduurzamen, door bijvoorbeeld hun energieverbruik en CO₂-uitstoot substantieel terug te dringen. Een belangrijke maatregel daartoe is het verbeteren van de efficiëntie, om zo bijvoorbeeld het aantal voertuigbewegingen te reduceren en daarmee de uitstoot en het energieverbruik te verlagen.

Verduurzaming vraagt om een cultuuromslag in de sector, waar de focus lang heeft gelegen op winstmaximalisatie. Een gedegen cultuuromslag bewerkstelligen is echter niet eenvoudig.

Digitalisering kent vele vormen en kan een serieuze investering van de sector vergen. Ook is nog niet duidelijk welke digitaliseringsingrepen effectief zijn. Er zijn diverse vormen denkbaar, zoals het gebruik van big data, cloud computing en artificial intelligence (AI). Deze technologieën kunnen allemaal bijdragen aan een wereldwijd efficiënter aansturen van goederen-, geld- en informatiestromen. De vraag is waar de logistieke sector wil uitkomen. Wat krijgt prioriteit?

1.2 Verduurzaming en beperking van CO₂-uitstoot door de logistieke sector

Duurzaamheid is een breed begrip, maar het komt erop neer dat in een duurzame leefomgeving mens, milieu en economie met elkaar in evenwicht zijn, waardoor bijvoorbeeld uitputting van de aarde wordt voorkomen.

CO₂-uitstoot door de logistieke sector

Overheden, industrie en wetenschap werken samen om bijvoorbeeld de luchtkwaliteit te verbeteren en de CO₂-uitstoot te verminderen. Dat raakt uiteraard ook de spelers in het verkeer en vervoer, aangezien zij grote uitstoters zijn. Tot voor kort was de logistieke sector met name gericht op het maximaliseren van winst; de niet-economische kosten, zoals voor milieu en veiligheid, kregen weinig aandacht. In 2015 is hier verandering in gekomen, ingegeven door veranderde regels. Tijdens de Paris Climate Conference in december 2015 sloten 195 landen namelijk het allereerste bindende klimaatakkoord. Dat akkoord omvat een mondiaal actieplan om de opwarming van de aarde te beperken tot minder dan 2 graden Celsius.

De CO₂-uitstoot van de logistieke sector en daarmee haar aandeel in de opwarming van de aarde is substantieel. In 2019 bedroeg de CO₂-uitstoot van de logistiek circa 10,6 megaton, op een totale uitstoot van 138 megaton. Van de uitstoot door de logistiek kwam ongeveer 41% voor rekening van achterland- en continentaal transport, terwijl de stadslogistiek verantwoordelijk was voor 34% van de uitstoot.

Gegeven het substantiële aandeel van de logistieke sector in de totale CO₂-uitstoot, heeft de Nederlandse overheid een visie ontwikkeld op duurzame brandstof voor transportmodaliteiten, zoals wegtransport, scheepvaart en luchtvaart. Deze visie bestaat eruit dat verduurzaming van de logistieke sector kan worden bereikt door over te stappen van fossiele brandstoffen op duurzame energiebronnen. In de Klimaatwet

zijn de klimaatdoelen uitgewerkt. In deze wet staat dat er in 2030 49% en in 2050 95% minder CO₂-uitstoot moet zijn dan in 1990.

Elektrificatie en verbetering van de efficiëntie

Het kabinet heeft op grond van de Klimaatwet het Klimaatplan opgesteld, voor de periode 2021-2030. In dit plan wordt elektrificatie van transportmiddelen gezien als een van de meest veelbelovende mogelijkheden om de uitstoot te beperken. Dit betekent echter wel dat een deel van de uitstoot van de logistieke sector wordt verplaatst naar de energiesector, waardoor het effect van elektrificeren beperkt blijft.



Gevolgen van klimaatverandering

Alleen elektrificeren van de logistieke sector is dus zeer waarschijnlijk niet voldoende om de CO₂-doelen te halen. Daarvoor is ook een verbetering van de efficiëntie van de logistieke sector vereist. Met minder voertuigbewegingen is er bijvoorbeeld directe winst te behalen in de beperking van uitstoot en energieverbruik. Elektrificatie en verbetering van de efficiëntie zullen vermoedelijk samen wel zorgen voor een voldoende duurzame logistiek. Tegelijkertijd biedt dat kansen voor de Nederlandse logistieke sector om haar koppositie te behouden, omdat zij dan met minder investeringen meer kan bereiken. Aangenomen kan immers worden dat processen slimmer inrichten om minder investeringen vraagt dan het op grote schaal vervangen van de bestaande bedrijfsmiddelen (zoals vrachtauto's) door bedrijfsmiddelen die worden aangedreven voor duurzame energie.

Verbetering van de efficiëntie kunnen bedrijven onder meer bereiken door de locaties van hun warehouses zo optimaal mogelijk te kiezen. Een warehouse is een locatie waar

goederen worden opgeslagen, die later worden gedistribueerd. (De term distributiecentrum wordt soms als synoniem gebruikt voor warehouse, maar in tegenstelling tot een distributiecentrum houdt een warehouse zich niet bezig de verwerking van bestellingen.) Door de optimale locatie van hun warehouses te kiezen, kunnen logistieke bedrijven het aantal bewegingen van hun voertuigen beperken.

De logistieke sector kan haar efficiëntie ook verbeteren door de routes van de transportmiddelen aan te passen. Door het optimaliseren van hun routes kunnen logistieke bedrijven bijdragen aan het verlagen van de filedruk en het aantal gereden kilometers verminderen.

Ook het voorspellen van de transportvraag kan leiden tot een verbetering van de efficiëntie. Hierdoor wordt het immers mogelijk om onnodig leegrijden te voorkomen.

Ten slotte kan het voorspellen van benodigd onderhoud of vervanging van onderdelen van transportmiddelen leiden tot een betere efficiëntie. Hiermee kunnen logistieke bedrijven immers onnodig uitval van transportmiddelen voorkomen en verstoringen in hun logistieke keten beperken.

Artificial intelligence als mogelijke oplossing

Met name AI lijkt een veelbelovende technologie om de logistiek efficiënter en duurzamer te maken. AI kan namelijk worden ingezet om patronen te herkennen en van daaruit voorspellingen te doen en om processen te optimaliseren. Maar tegelijkertijd is AI een nog heel nieuwe technologie waarvan de potentie nog lang niet is uitgekristalliseerd. Het zou kunnen dat het bedrijfsleven met deze technologie grote stappen kan maken om de gewenste verbetering te bereiken, maar misschien ontstaan er door de inzet van AI wel problemen op andere vlakken. Daarom moet er eerst nog onderzoek worden gedaan naar de manieren waarop AI kan bijdragen aan het verduurzamen van de logistieke sector.

1.3 Meer efficiëntie met AI?

Zoals gesteld, lijkt AI een interessante technologie om de logistiek duurzamer te maken. Maar wat is AI nu eigenlijk? In de literatuur zijn vele omschrijvingen te vinden. Binnen mijn lectoraat hanteer ik de definitie zoals geformuleerd door McCarthy (2004). Deze definitie luidt als volgt:

"AI is the science and engineering of making intelligent machines, especially intelligent computer programs. It is related to the similar task of using computers to understand human intelligence, but AI does not have to confine itself to methods that are biologically observable."

AI kent vele verschijningsvormen. Voorbeelden van AI zijn *machine learning* (uitvoeren van een taak door computers door middel van leren zonder expliciet geprogrammeerd te zijn voor de taak), *recommender systems* (bijvoorbeeld genereren van aanbevelingen met AI), *automation* (automatiseren van processen), *machine vision* (automatische herkenning van beelden) en *robotics* (robotiseren van processen). Zo doen bijvoorbeeld streamingdiensten, zoals Netflix, aanbevelingen aan de gebruikers voor series of films die zij leuk zouden kunnen vinden; deze aanbevelingen worden gegenereerd met een *recommender system* dat wordt aangestuurd door AI.



Naar een efficiëntere en duurzamere logistiek met AI

De potentie van AI in het bereiken van meer efficiëntie lijkt groot en kansrijk, maar hoe de logistieke sector deze technologie kan inzetten, is nog niet uitgekristalliseerd. AI moet worden gezien als een middel om een doel, zoals het verbeteren van de efficiëntie of de duurzaamheid, te bereiken. Een systeem is met AI in staat om accurate beslissingen te nemen in situaties waarbij meerdere factoren een rol spelen. Dat kan heel nuttig zijn, want het blijkt voor mensen vaak lastig en soms zelfs onmogelijk om alle relevante factoren in een beslissing te betrekken. Hierdoor bestaat de kans dat ze niet altijd de beste beslissingen nemen. Het is wel belangrijk dat ontwikkelaars en gebruikers van AI ervoor blijven zorgen dat de inzet van AI verantwoord gebeurt: *responsible AI*.

Een aandachtspunt is dat de maatschappij steeds afhankelijker wordt van de kracht en de gigantische omvang van AI-algoritmes. Hoe verstandig is het als de logistieke sector steeds meer vertrouwt en afhankelijk is van deze technologieën? Veel modellen en technieken binnen AI staan bekend om hun gebrek aan transparantie. Dit soort

modellen worden *black boxes* genoemd, omdat onduidelijk is hoe zij tot bijvoorbeeld hun voorspelling komen. Dit komt doordat algoritmes binnen een *black box* zelflerend zijn, waardoor mensen niet meer intuïtief kunnen begrijpen hoe de voorspelling tot stand komt.

Het brengt een groot risico met zich mee als voor belangrijke beslissingen sterk vertrouwd wordt op de voorspelling van de AI-modellen, terwijl niemand kan controleren of er tijdens het produceren van de voorspelling fouten zijn gemaakt. Wanneer managers in de logistiek bedrijfskritische beslissingen nemen op basis van oordelen die tot stand zijn gekomen met AI, terwijl zij niet weten hoe deze oordelen tot stand komen, kunnen er ongewenste resultaten ontstaan met mogelijk grote gevolgen.

1.4 Opdracht van het lectoraat

Uit het voorgaande komt naar voren dat onze maatschappij, en zeker de logistieke sector, voor enorme uitdagingen staat, mede gezien de zeer ambitieuze klimaatdoelstellingen. Mijn lectoraat Artificial Intelligence en Logistiek is onderdeel van Centre of Expertise HRTech van Hogeschool Rotterdam, en kan van daaruit bijdragen aan het onderzoek naar de rol die AI kan spelen in het efficiënter en duurzamer maken van logistieke processen en daarmee in het innoveren van de logistieke sector. Het lectoraat zal er hierbij rekening mee houden dat AI transparant en verantwoordelijk moet zijn. Dit leidt tot de volgende opdracht voor mijn lectoraat:

Onderzoek op welke manier *responsible artificial intelligence* een waardevolle bijdrage kan leveren aan het verbeteren van de duurzaamheid van de logistiek door het efficiënter inrichten van de verschillende processen.

Mijn opdracht is om met behulp van praktijkgericht onderzoek een bijdrage te leveren aan het duurzamer maken van de logistieke sector. Bij dit praktijkgerichte onderzoek streef ik naar een sterke verbinding tussen onderzoek en onderwijs. Verbinding met de studenten in het onderwijs is van groot belang omdat dit hen als professionals van morgen in staat stelt om met moderne technologie om te gaan en te weten welke mogelijkheden AI biedt om logistieke processen efficiënter en duurzamer te maken.

Het lectoraat wil zich in de eerste plaats richten op de mogelijkheden van responsible AI in het optimaliseren van strategische en tactische processen in de logistiek. Een voorbeeld hiervan is het optimaliseren van de locaties van warehouses, om de hoeveelheid kilometers die transportmiddelen afleggen, te verkleinen en daarmee de CO₂-uitstoot te beperken. In de tweede plaats richt mijn lectoraat zich op de rol die responsible AI kan bieden in het optimaliseren van operationele processen in de logistiek.

Optimalisatie van logistieke processen

2.1 Inleiding

Om te snappen hoe de logistieke sector een efficiëntieslag kan maken, is het belangrijk om eerst vast te stellen hoe de logistiek grofweg in elkaar zit. In de regel is een logistiek traject opgebouwd als een keten van elkaar opvolgende vervoersactiviteiten en de daarbij behorende partijen. Zo'n keten wordt een *supply chain* of logistieke keten genoemd. De organisatie van een logistieke keten is tamelijk complex, want alles moet op het juiste moment in de juiste hoeveelheid op de juiste plek zijn. Dit vraagt om een meerlaagse benadering van de keten en de opgaven daarbinnen.



Belangrijke keuzes maken binnen de planningshorizon

Planningshorizon

In het managen van de logistieke keten worden meestal drie niveaus onderscheiden die afhankelijk zijn van de planningshorizon. Een planningshorizon is de toekomstige tijdsduur waarop een plan betrekking heeft.

In dit kader worden het strategisch, tactisch en operationeel niveau onderscheiden. Strategische beslissingen zijn beslissingen die een effect op de lange termijn hebben

en raken aan de essentie van het bedrijf. Dit zijn beslissingen over welke afzetmarkt het bedrijf bedient, welke logistieke principes het inzet (bijvoorbeeld consistentie en complexiteit) en welke modaliteiten (vervoerswijzen) het gebruikt (bijvoorbeeld wegtransport of maritiem). Maar ook beslissingen over duurzaamheidsdoelen zijn strategische beslissingen.

Tactische beslissingen gaan over de middellange termijn, meestal over de komende paar jaar. Deze beslissingen betreffen kwesties als het aantal, de locatie en de capaciteit van warehouses en de productiefaciliteiten, alsmede de stroom van goederen door het logistieke netwerk. Deze beslissingen gaan veelal gepaard met grote investeringen. Overigens kunnen veranderingen gedurende de levensduur van een faciliteit zoals een warehouse, van invloed zijn op hoe efficiënt of duurzaam deze faciliteit is.

Operationele beslissingen gaan over de korte termijn. Deze beslissingen betreffen de uitvoering van de actuele bedrijfsprocessen. Deze processen zien op een minder lange termijn dan de strategische en tactische processen, maar beslissingen daarover kunnen nog steeds een substantiële invloed hebben op de efficiëntie van de logistiek. Zo kan het uitvallen van een transportmiddel doordat het onderhoud daarvan niet tijdig is uitgevoerd, leiden tot een flinke verstoring in de logistieke keten. En de beslissing over het aanschaffen van een zuinig rijdend transportmiddel kan bijdragen aan het verhogen van de efficiëntie.

Op alle drie de niveaus van de logistieke keten liggen kansen om de efficiëntie en dus de duurzaamheid van de logistiek te verbeteren. Hierbij is van belang in hoeverre er al sprake is van digitalisering, omdat dit bepalend is voor de slagingskansen van de inzet van AI. Verder is van belang waar de bestaande digitalisering op gebaseerd is en welke systematiek wordt gehanteerd. Op basis van deze stand van zaken kan een bedrijf een goed inschatten welke AI-ontwikkelingen het kan inzetten, waarvan verwacht mag worden dat die de efficiëntie (verder) verbeteren. Hieronder zijn de kansen per niveau uitgewerkt.

Strategisch niveau

Met het opnemen van efficiëntie als uitgangspunt in het bedrijfsbeleid ontstaat er een fundament om digitalisering als belangrijke voorwaarde voor de bedrijfsorganisatie aan te merken. Doordat de logistieke opgave steeds complexer wordt en de concurrentie groeit, zullen bedrijfsmodellen meer en meer leunen op digitalisering. Digitalisering is voorwaardelijk om efficiënter te gaan werken en tegelijkertijd ook de opening naar een duurzamere logistiek. Het is vooral belangrijk dat met AI inzichtelijk wordt gemaakt welke winst te behalen valt met digitalisering. Het lectoraat steekt

hierop in en werkt aan een set van maatregelen die deze strategische beslissingen ondersteunen. Deze set van maatregelen wordt nader uitgewerkt in hoofdstuk 3.

Tactisch niveau

Op tactisch niveau zijn er diverse optimalisatieslagen mogelijk. Enerzijds gaat dat over de efficiëntere aansturing van bedrijfsprocessen en anderzijds over de keuzes voor bepaalde bedrijfsprocessen. De keuze om te werken met een bepaald digitaal model of een bepaalde benadering, zoals AI, bevindt zich op het tactische niveau. De inrichting van het bedrijf zit ook op tactisch niveau; welke vervoersmiddelen, hoeveel warehouses en op welke locatie? Omdat er flinke winst kan worden behaald met goede en slimme tactische beslissingen, zetten bedrijven digitalisering hier al in, onder meer bij de keuze van de locaties van de warehouses.

Operationeel niveau

Op operationeel niveau zitten alle logistieke handelingen van een organisatie: het daadwerkelijke vervoer van goederen van de ene plek naar de andere en het op- en overslaan. Hierbij gebruiken organisaties digitalisering om zo efficiënt mogelijk te werken. Dit komt terug bij zaken als *orderpicking*, maar ook bij de vervoersbewegingen. De keuzes voor het inzetten van bepaalde bedrijfsassets en de volgorde daarin, zijn de zogenoemde logistieke-pad-beslissingen. In alle processen zit al een zekere mate van digitalisering. Het onderhoud van vervoersmiddelen valt ook onder het operationeel niveau; hierbij valt nog veel winst te halen op het gebied van optimalisatie en efficiëntie, met bijvoorbeeld *predictive maintenance*.

Kansen voor efficiëntieverbetering op verschillende niveaus

In het vervolg van dit hoofdstuk ga ik nader in op de kansrijke gebieden voor efficiëntieverbetering. In het kader van tactische processen zal ik mij hierbij richten op het optimaliseren van de locaties van warehouses. Bij de operationele processen richt ik mij met name op het optimaliseren van het logistieke pad (route-optimalisatie) met behulp van cyber-fysieke systemen, het beter op elkaar afstemmen van transportvraag en -aanbod, *smart warehousing* en *predictive maintenance*. Het totaal van de voorgestelde verbeteringen en het onderzoek uit mijn lectoraat zullen leiden tot verduurzaming van de logistieke sector, wat in essentie een ingreep op strategisch niveau behelst.

2.2 Optimalisatie van de locaties van warehouses en hubs

De locatie van een warehouse en hub bepaalt het aantal voertuigbewegingen. Hierbij is het belangrijkste verschil tussen een warehouse en een hub dat een centraal operationeel platform is binnen een transportnetwerk (gericht op het reduceren van de transportkosten). Een centraal gelegen warehouse of hub kan zorgen voor de kortste

distributieroutes. Het optimaliseren van de locatie biedt daarom serieuze kansen voor het verbeteren van de logistieke efficiëntie. Er is al behoorlijk wat kennis over optimalisatie beschikbaar uit onderzoek, maar het meeste onderzoek is gericht op andere technieken dan AI.

In zijn algemeenheid blijkt uit de literatuur dat er vele modellen beschikbaar zijn, die beslissers helpen bij de tactische planning van hun logistieke keten. Veel van deze modellen zijn gebaseerd op methoden ontleend aan *operations research* (OR). OR richt zich op het ontwikkelen en toepassen van analytische methoden die het nemen van beslissingen kunnen ondersteunen. OR maakt hierbij gebruik van wiskundige modellen en technieken. De analytische methoden van OR gebruiken meestal *linear programming* voor de optimalisatie van de locaties van warehouses en hubs. *Linear programming* is een wiskundige methode om het beste besluit te nemen in een situatie waarbij verschillende keuzes mogelijk zijn en er beperkingen zijn op de beschikbare middelen. Bij *linear programming* worden alle keuzes en beperkingen in wiskundige vergelijkingen weergegeven. Deze vergelijkingen worden vervolgens gebruikt om een doelfunctie te optimaliseren, wat betekent dat er gezocht wordt naar de beste oplossing die voldoet aan alle beperkingen. Een voorbeeld van *linear programming* zou kunnen zijn: stel dat je een bepaalde hoeveelheid geld hebt om te investeren in aandelen en obligaties en dat je wilt maximaliseren hoeveel geld je over een bepaalde periode verdient. Je kunt dan vergelijkingen opstellen die laten zien hoeveel rendement je kunt behalen met verschillende investeringen, en hoeveel geld je maximaal kunt investeren. Met behulp van deze vergelijkingen kun je vervolgens de optimale verdeling van de investeringen bepalen.

Arntzen et al. (1995), Amiri (2006) en Wouda et al. (2002) pasten in hun onderzoek bijvoorbeeld deze techniek toe om de productie en distributie van verschillende producten te plannen, om het optimale aantal en de capaciteit van warehouses te bepalen en om de optimale locaties van die warehouses te bepalen.

Het belangrijkste voordeel van AI ten opzichte van *linear programming* is dat het bij *linear programming* al vrij snel erg complex wordt als er een groot aantal variabelen wordt gebruikt. Een hoge mate van complexiteit vraagt om veel rekenkracht van computers en dan wordt het al snel erg duur. Ook is deze techniek minder flexibel.

Naast *linear programming* hebben onderzoekers ook simulatiemethoden bekeken, die gebruikt kunnen worden bij het nemen strategische en tactische beslissingen in de logistieke keten. Bijvoorbeeld Hidaka en Okano (1997) hebben een aanpak gebaseerd op simulaties ontwikkeld om te helpen bij het selecteren van de locatie van een warehouse. Ze gebruikten hierbij een digitale kaart. Bovendien maakten ze gebruik van

heuristische methoden; deze methoden leiden tot een oplossing die bij benadering, dus niet exact, optimaal is. De toepassing van AI zou hier wellicht een beter resultaat kunnen opleveren, omdat op AI gebaseerde methoden immers wel in staat zijn om snel een exact optimale oplossing te genereren.

Behalve de combinatie van *linear programming* en simulatiemethoden hebben onderzoekers ook *genetic algorithms* toegepast om de optimale locatie van een warehouse te bepalen, zoals Kratica et al. (1998). Kratica et al. (1998) namen in dit kader aan dat deze methode tot een meer optimale oplossing zou leiden dan de heuristische methoden.

Genetic algorithms zijn een manier om computers te laten leren en problemen op te lossen door middel van evolutie, geïnspireerd op de manier waarop genen evolueren in de natuur. Het werkt als volgt: een probleem wordt vertaald naar een set van regels en parameters die de computer kan aanpassen. Deze regels en parameters worden behandeld als 'genen' die in verschillende combinaties worden geërfd, geselecteerd, gemuteerd en gekruist. Door deze processen toe te passen op populatie van individuen die elk een set van genen vertegenwoordigen, kan de beste oplossing voor een probleem worden gevonden. Een voorbeeld van een probleem, naast het kiezen van de locatie van een warehouse, is het vinden van de beste route voor een koerier om alle pakketten af te leveren. De regels en parameters zouden dan bijvoorbeeld kunnen bestaan uit de afstanden tussen de verschillende locaties en de volgorde waarin de pakketten moeten worden afgeleverd. De computer zou vervolgens een populatie van mogelijke routes creëren en deze laten evolueren door selectie, mutatie en kruising, totdat de beste route is gevonden.

Tenslotte is ook *fuzzy logic* veelvuldig toegepast voor het selecteren van de locatie van warehouses (zie bijvoorbeeld Ou & Chou, 2009; Ekmekçioğlu et al., 2010 en Kuo, 2011). *Fuzzy logic* is een soort logica die niet alleen gebruik maakt van traditionele 'waar' of 'onwaar' waarden maar ook gebruik maakt van gradaties van waarheid. Met andere woorden, in *fuzzy logic* kunnen uitspraken waar zijn in verschillende mate, afhankelijk van de context en de omstandigheden. Een voorbeeld van *fuzzy logic* is het bepalen van de temperatuur in een kamer. In traditionele logica zou de temperatuur ofwel 'warm' of 'koud' zijn, maar in *fuzzy logic* zou de temperatuur gradaties van warmte kunnen hebben, zoals een 'beetje warm', 'gematigd warm' of 'erg warm'. *Fuzzy logic* is nuttig omdat het beter in staat is om om te gaan met complexe en onzekere situaties waarin traditionele logica te beperkt is. Het wordt bijvoorbeeld veel gebruikt in toepassingen zoals de besturing van machines en robots, in de automatische regeling van temperatuur en vochtigheid en in besluitvormingssystemen zoals het selecteren van de locatie van een warehouse of hub. Een belangrijk nadeel van deze methode is

echter dat mogelijke voorspellers van een optimale locatie van een warehouse of hub vooraf moeten worden bepaald en dus voor een groot deel afhankelijk zijn van de inschattingen van experts.

Uit deze paragraaf komt naar voren dat het probleem van het optimaliseren van tactische processen en met name de locatie van warehouses zeer uitgebreid onderzocht is. Binnen het beschikbare onderzoek is gebruik gemaakt van een breed scala aan methoden en technieken, zoals *linear programming*, *genetic algorithms*, en *fuzzy logic*. Het valt op dat weinig tot geen onderzoek is uitgevoerd naar de mogelijkheden die AI biedt bij het selecteren van een locatie voor warehouses. Het gebruik van AI kan juist een oplossing bieden in complexe situaties, waarin er sprake is van een groot aantal factoren waarmee rekening moet worden gehouden. Daarnaast gaan de meeste onderzoeken uit van het minimaliseren van kosten om tactische processen te optimaliseren; duurzaamheid wordt slechts zelden betrokken in de afwegingen.

2.3 Optimalisatie van distributieroutes

Operationele logistiek gaat met name over de verplaatsing of inzet van de hardware van de logistiek (zoals de vervoersmiddelen, de producten en de stellingen in het warehouse). Traditioneel is dit operationele systeem een vrij laagwaardig technologisch systeem, waarbij vooral mensen dingen verplaatsen. Hoe zij dat doen, beslissen ze vaak zelf.

In de regel wordt het bijvoorbeeld aan de bestuurder van het transportmiddel overgelaten welke route hij of zij neemt. Deze beslissing is meestal gebaseerd op de ervaring van de bestuurder of informatie van derden. Informatie over actuele verkeersstromen wordt hier zelden in meegenomen, met als gevolg dat de bestuurder vaak in de file belandt. Dat is heel vervelend voor de bestuurder (en het milieu), maar kan ook nog eens leiden tot verstoringen in de logistieke keten. Het mag duidelijk zijn dat deze situatie suboptimaal is en weinig duurzaam.

Modernisering en digitalisering van dit soort activiteiten ligt gevoelig en komt nog maar weinig voor. Toch kan daar veel winst mee worden geboekt. Dit (her)routeren van transportmiddelen kent namelijk veel knopen en daarmee een hoge complexiteit, en de bestuurder moet direct kunnen beslissen welke (andere) route hij of zij neemt. Omdat deze processen en activiteiten ook kansen voor optimalisatie van de route bieden, is dit onderzoeksgebied inmiddels verkend. Ik bespreek hier het reeds uitgevoerde onderzoek op dit gebied.



AI en IoT als belangrijke enablers

Een belangrijke ontwikkeling die ook in de logistieke sector wordt ingezet, betreft de zogenaamde cyber-fysieke systemen. Dit is technologie die fysieke objecten koppelt aan een digitaal systeem. Een belangrijke technologie die hiervoor wordt ingezet, is *Internet of Things* (IoT). IoT is een netwerk van fysieke objecten waarin sensoren, software en andere technologieën zijn ingebouwd om deze objecten met het internet te verbinden en gegevens uit te wisselen met andere apparaten en systemen. Sinds de ontwikkeling in 1999 is het concept steeds volwassener geworden en steeds meer toegepast in de industrie. Deze technologie voor een revolutie zorgen in de economische en sociale ontwikkeling van de industrie en dus ook van de logistiek. Zeker nu traditionele logistieke managementmethoden niet meer geschikt lijken te zijn in de ontwikkeling van de moderne logistiek.

Onderzoek naar optimalisatie van de route middels IoT richt zich vooral op het gebruik van *ant colony optimization*. *Ant colony optimization* is ontleend aan operations research (OR), dat ik heb besproken bij de optimalisatie van de locatie van warehouses en hubs.

Ant colony optimization is een algoritme dat is geïnspireerd op het gedrag van mieren bij het zoeken naar voedsel. Wanneer mieren voedsel vinden, laten ze een geur achter op hun weg terug naar het nest, zodat andere mieren de geur kunnen volgen en ook bij

het voedsel kunnen komen. In *ant colony optimization* wordt dit gedrag van mieren nagebootst om oplossingen te vinden voor complexe problemen, zoals het vinden van de kortste route tussen twee punten op een kaart of het plannen van de optimale route voor een logistieke dienst. Het algoritme werkt door een aantal virtuele 'mieren' te laten zoeken naar een oplossing voor het probleem. Elke mier volgt een pad en laat een feromoon achter op het pad. Feromonen zijn chemische stoffen die andere mieren aantrekken. Wanneer een mier een kortere weg vindt, zal deze sneller terugkeren naar het beginpunt en meer feromonen achterlaten op het kortere pad. Na verloop van tijd zal het feromoon op het kortere pad sterker worden, waardoor het een voorkeursroute wordt.

In het kader van optimalisatie van de distributieroute moet ik het onderzoek van Ding et al. (2018) noemen. Het netwerkmodel dat zij voorstellen, had tot doel het managen van de logistieke keten. Het voorgestelde model maakt gebruik van *radio frequency identification* (RFID) en het *global positioning system* (GPS). RFID is een technologie om vanaf een afstand informatie op te slaan en af te lezen van zogenaamde tags die op of in objecten zitten. Een voorbeeld hiervan is *near field communication* (NFC), waarvan gebruik wordt gemaakt in bijvoorbeeld credit cards, ov-chipkaarten en mobiele telefoons. Gebaseerd op real-time informatie gegenereerd met RFID, werden managers van logistieke ketens hiermee in staat gesteld om de optimale routes te plannen, te monitoren en aan te passen op basis van hun ervaring.

Bij het vaststellen van de optimale route voor transportmiddelen is in onderzoek verder vaak gebruik gemaakt van het *simulated annealing algorithm*.

Het *simulated annealing algorithm* wordt gebruikt om optimale oplossingen te vinden voor complexe problemen. Het algoritme is gebaseerd op de manier waarop metalen afkoelen en uitharden. Wanneer een metalen object wordt verhit en vervolgens langzaam wordt afgekoeld, zal het uiteindelijk uitharden in een vaste structuur. Als het object daarentegen snel wordt afgekoeld, zal het uitharden in een minder stabiele, willekeurige structuur. In *simulated annealing* wordt dit proces nagebootst om de beste oplossing voor een probleem te vinden. Het algoritme werkt door een aantal willekeurige oplossingen te genereren en deze oplossingen te beoordelen op hun kwaliteit. Vervolgens wordt er willekeurig een nieuwe oplossing gegenereerd en wordt deze oplossing vergeleken met de huidige oplossing. Als de nieuwe oplossing beter is dan de huidige oplossing, wordt deze geaccepteerd en wordt het proces herhaald met deze nieuwe oplossing. Als de nieuwe oplossing echter slechter is dan de huidige oplossing, dan kan deze nog steeds worden geaccepteerd, afhankelijk van de 'temperatuur' van het algoritme. Deze temperatuur staat voor de mate van willekeurigheid in het genereren van nieuwe oplossingen. Als de temperatuur hoog is, zal het algoritme eerder slechtere

oplossingen accepteren. Naarmate de temperatuur daalt, wordt het algoritme 'strenger' en zal het alleen nog maar betere oplossingen accepteren.

Dit algoritme is derhalve geschikt voor het oplossen van grootschalige optimalisatieproblemen en heeft grote praktische waarde. Echter, de oplossingen zijn niet per se optimaal. Gebaseerd op het kortste pad en de kortste tijd optimaliseerden Dong et al. (2021) het logistieke pad op stedelijke wegen. Hierbij maakten zij gebruik van het *simulated annealing algorithm*. Zij vonden dat het algoritme redelijk precies is en praktische waarde heeft in het oplossen van het zogenaamde *traveling salesman problem*. Het traveling salesman probleem is een wiskundig probleem dat gaat over het vinden van de kortste route die een reizende verkoper moet afleggen om een aantal steden te bezoeken en uiteindelijk terug te keren naar zijn beginpunt. Bij dit probleem heeft een verkoper een lijst met verschillende steden die hij moet bezoeken en wil zo min mogelijk afstand afleggen om alle steden te bezoeken en uiteindelijk terug te keren naar het beginpunt. Het probleem is dat de afstand tussen twee steden afhankelijk is van de route die de verkoper neemt.

Het is echter bij het *simulated annealing algorithm* lastig om veel factoren in de optimalisatie mee te nemen. Ook dit algoritme leidt al snel tot te veel complexiteit en is daardoor minder geschikt voor het snel nemen van beslissingen. Dit is ook het geval wanneer er veel plekken moeten worden bezocht waar bijvoorbeeld vracht moeten worden geladen of gelost.

Ik verwacht dat net als bij het optimaliseren van de locatie van warehouses, AI ook goede diensten kan bewijzen bij het optimaliseren van de route. Zeker in het geval van incidenten (zoals ongelukken op de weg) die leiden tot vertraging en doordoor het plannen van een andere route noodzakelijk maken, is het belangrijk dat er snel een oplossing wordt gegeven. De tot nu toe gebruikte technieken, zoals *ant colony optimization* en *simulated annealing*, zijn hiertoe onvoldoende in staat. Van AI kan worden aangenomen dat deze hier wel toe in staat is, doordat AI werkt op basis van 'trainen', waarna het getrainde model snel resultaten kan genereren. In het volgende hoofdstuk beschrijf ik op welke manier mijn lectoraat hiernaar onderzoek gaat doen.

2.4 Betere voorspelling van de vraag naar transport

In de vorige paragraaf heb ik aangegeven dat AI mogelijk goede diensten kan bewijzen bij het kiezen van de optimale route voor transportmiddelen. De optimale route is echter niet de enige bepalende factor voor efficiënt transport. Een andere factor is de optimale match tussen de transportvraag en de transportcapaciteit. Een goede match voorkomt dat transportmiddelen rijden zonder goederen aan boord en onnodige kilometers rijden. Hiervoor is gedetailleerde real-time informatie nodig.

De methode van de *artificial neural networks* (ANN's) leent zich goed voor het voorspellen van de vraag naar transport, en is in het bijzonder in havens populair. Een ANN is een computerprogramma dat is ontworpen om taken uit te voeren op een manier die lijkt op de manier waarop het menselijk brein werkt. Het ANN is opgebouwd uit verschillende lagen van neuronen die met elkaar zijn verbonden. Elke neuron ontvangt input van andere neuronen en verwerkt deze input op een bepaalde manier. De output van een neuron wordt vervolgens gebruikt als input voor andere neuronen in de volgende laag van het netwerk. Door het aanpassen van de manier waarop de input wordt verwerkt door elke neuron in het netwerk kunnen ANN's worden getraind om bepaalde taken uit te voeren. Het trainingsproces van een ANN is gebaseerd op *supervised learning* waarbij het netwerk wordt gevoed met voorbeeld van input en de bijbehorende output. Het netwerk past zich aan door de input-output relatie te leren, zodat het in staat is om op basis van nieuwe input de juiste output te voorspellen. ANN's zijn in staat om complexe modellen te trainen, maar hebben daarvoor wel vaak een grote hoeveelheid data nodig (Hastie et al., 2009; Liu et al., 2021; Jiang et al., 2010)

Al in 1999 werd deze techniek toegepast in dit domein, vooral om havengerelateerde voorspellingen te doen over bijvoorbeeld de doorvoer van containers, de vrachtbewegingen, de transportvraag of de vraag naar vracht bij terminals (Wei & Yang, 1999; Lam et al., 2004; Gosasang et al., 2011). De onderzoekers pasten de ANN-modellen in verschillende havens en in verschillende situaties toe. Ze vergeleken deze ANN-modellen onder meer met de methode van de lineaire regressie en concludeerden dat de ANN-modellen aanmerkelijk accurater waren in het voorspellen van de transportvraag dan meer traditionele methoden.

Onderzoekers en logistieke bedrijven hebben ook regelmatig *support vector machines* (SVM's) gebruikt om de transportvraag te voorspellen. Een SVM is een *machine learning algorithm* dat wordt gebruikt voor zowel het voorspellen van categorieën als het voorspellen van een continue grootheid, zoals de vraag naar een product of dienst. Het doel van een SVM is om een beslissingsgrens te vinden die de gegevens scheidt in verschillende categorieën. Bij het trainen van een SVM wordt een dataset gebruikt met voorbeelden van inputdata en bijbehorende output. Het algoritme leert vervolgens een beslissingsgrens te vinden die de verschillende output van elkaar scheidt. De beslissingsgrens wordt gevonden door te zoeken naar een hyperplane (dit is een $n-1$ dimensionaal vlak in een n -dimensionele ruimte) dat de gegevens op een optimale manier scheidt. Het doel is om de afstand tussen de hyperplane en de dichtstbijzijnde datapunten (de zogenaamde *support vectors*) te maximaliseren. Op deze manier kan een SVM voorspellingen doen over nieuwe gegevens die in de toekomst worden geïntroduceerd.

Deze algoritmes worden vooral gebruikt in situaties dat de data de vorm heeft van een tijdreeks. Bij het voorspellen van de vraag door middel van tijdreeksdata wordt niet zo zeer gekeken naar externe voorspellers van de vraag (zoals de economische ontwikkeling), maar vooral naar de vraag in het verleden. Hierbij wordt er dus vanuit gegaan dat het verleden een goede voorspeller is voor de toekomst. Wu en Pan (2010) pasten in dit kader een SVM toe om het totale containervolume in de haven van Jiujiang te voorspellen.



Voorspellen van de transportvraag met AI

Uit de literatuur blijkt dat de afgelopen jaren veel verschillende hybride modellen zijn toegepast om de logistieke vraag te voorspellen (Liu et al., 2007; Zhang et al., 2013; Xie et al., 2013; Niu et al., 2018; Milenković et al., 2021). Hybride modellen combineren verschillende modellen, om zo tot de beste voorspelling te komen. Wu en Pan (2010) combineerden in hun onderzoek twee bestaande modellen die voorspellingen doen met behulp van ANN. Het reikt te ver om alle toegepaste hybride modellen hier uitgebreid te beschrijven, maar uit onderzoek blijkt dat de gecombineerde voorspellingen een aanzienlijk hogere accuraatheid hebben dan de verschillende modellen apart.

Uit het voorgaande kan worden opgemaakt dat veel onderzoek is gedaan naar het voorspellen van de transportvraag. Hierbij zijn legio algoritmes toegepast. Een groot deel van de aandacht gaat uit naar het gebruik van ANN's en hybride modellen. Zowel bij ANN's als bij hybride modellen wordt echter nog steeds gebruik gemaakt van meer traditionele ANN's. Bovendien valt op dat, mede door het gebruik van deze beperkte technieken, het aantal factoren dat onderzoekers betrekken in de voorspelling, beperkt is. Meer geavanceerde AI-technieken, zoals *recurrent neural networks*, hebben onderzoekers slechts in beperkte mate toegepast.

Een *recurrent neural network* (RNN) is een type ANN (zie hiervoor) dat specifiek is ontworpen om te werken met sequentiële gegevens, zoals tijdreeksen. Een RNN heeft naast de standaard in- en outputlagen ook een '*hidden layer*' die informatie van vorige tijdstappen kan onthouden en gebruiken voor de verwerking van de huidige input. Dit maakt het mogelijk om contextuele informatie in de sequentiële gegevens te behouden en te gebruiken bij de voorspelling van de volgende stap in de tijdreeks. Bij het trainen van een RNN wordt gebruik gemaakt van '*backpropagation through time*'. Hierbij wordt de fout die gemaakt wordt bij de voorspelling van elke stap in de reeks teruggevoerd naar alle voorgaande tijdstappen. Dit stelt het RNN in staat om zich aan te passen aan de contextuele informatie in de gegevens en om steeds betere voorspellingen te doen naarmate er meer gegevens beschikbaar komen.

Het valt te verwachten dat deze meer geavanceerde technieken, onder andere doordat zij bij uitstek geschikt zijn voor tijdreeksdata, leiden tot een hogere accuraatheid van de voorspellingen van de transportvraag en daarmee tot een verdere toename in efficiëntie en duurzaamheid. In het volgende hoofdstuk beschrijf ik op welke manier mijn lectoraat hier onderzoek naar gaat doen.

2.5 Smart warehousing

In traditionele warehouses wordt de meeste energie verbruikt bij de opslag en de stroom van de goederen. Dus hoe efficiënter de warehouses omgaan met de opslag en stroom van producten, hoe minder energie ze verbruiken. Daarvoor is inzicht nodig in welke producten er in het warehouse aanwezig zijn en wat de restcapaciteit van het warehouse is, door middel van inventarisatie van de producten. Het mag bijvoorbeeld duidelijk zijn dat wanneer er sprake is van een substantiële restcapaciteit van het warehouse, dit leidt tot onnodig energieverbruik indien de desbetreffende organisatie hierin geen accuraat inzicht heeft.

Inventariseren is een tijdrovende en complexe activiteit; er is namelijk vaak sprake van verschillende goederenstromen die op verschillende momenten het warehouse binnenkomen en weer verlaten. Dat maakt dat er veel werknemers voor nodig zijn. Tijd en personeel zijn duur en niet eindeloos beschikbaar. Voor een groot deel is inventariseren nog steeds mensenwerk, waarbij onvermijdelijk fouten worden gemaakt. Handmatig inventariseren is niet erg efficiënt, terwijl de inkomende en uitgaande activiteiten een up-to-date en accuraat inzicht in de status van het de voorraad van het warehouse vergen. Fouten die gemaakt worden tijdens het inventariseren accumuleren bovendien over tijd, wat ervoor zorgt dat de beschikbare data en de werkelijkheid vaak niet met elkaar overeenkomen. Een correcte inventarisatie van de voorraad het warehouse is van groot belang om efficiënt te kunnen functioneren.

Rond 1960 vond er een technologische revolutie plaats in de ontwikkeling van warehouses, met de introductie van de barcode. Die maakte het mogelijk om real-time warehouse-managementsystemen (WMS) en automatisering te implementeren. Hoewel de barcode het inventariseren makkelijker maakte, is het nog steeds tijdrovend en complex; daarom wordt er tegenwoordig steeds meer geavanceerde technologie toegepast in warehouses. In paragraaf 2.3 heb ik al melding gemaakt van de technologie RFID, die het mogelijk maakt om vanaf afstand informatie op te slaan en af te lezen van zogenaamde tags, die op of in objecten zitten. Dat zorgt voor een automatische identificatie en real-time inzicht in de status van het warehouse (Ding et al., 2018).

Andere technieken voor identificatie van de status zijn QR-codes (Egger et al., 2018), magnetische strips (Liukkonen & Tsai, 2016), bluetooth (Han et al., 2018) en infrarood detectie (Chen et al., 2019). Het doel van QR-codes en magnetische strips is identificatie van producten op korte afstand, met als nadeel dat dit handmatig gebeurt met een scanner. RFID, bluetooth en infrarood detectie hebben andere nadelen, zoals hoge kosten, bevattelijkheid voor storingen en verminderde stabiliteit (Baesso et al., 2018). Hierdoor zijn deze technologieën minder goed geschikt voor het verschaffen van een robuust en accuraat inzicht in de status van het warehouse.

Vanwege de steeds groter wordende variatie in de klantbehoeftes, de beperktere inventarissen en de behoefte aan real-time informatie zijn de traditionele warehouses niet langer voldoende effectief (Lee et al., 2018). Daarom is er behoefte aan *smart warehouses*. Een *smart warehouse* is een warehouse dat volledig of grotendeels geautomatiseerd is en waar bijvoorbeeld de status van het warehouse real-time beschikbaar is door gebruik te maken van innovatieve technologie, zoals AI. In *smart warehouses* worden verschillende systemen gebruikt. Moderne warehouse-managementprocessen worden steeds meer gestuurd door op data gebaseerde softwareapplicaties op basis van AI, zoals een inventarismanagementsysteem (IMS) (Wang et al., 2015), geavanceerde planning en *scheduling*, transportmanagementsystemen (TMS), warehouse-managementsystemen (WMS) en resource planning. Het meest voorkomende domein voor *smart warehousing* is WMS. Een WMS beheert de processen in de levenscyclus van producten in het warehouse, bestaande uit het ontvangen, opslaan, ophalen en transporteren. Op dit moment geschiedt dit niet zelden met behulp van algoritmes ontleend aan OR en AI (Ross et al., 2009).

Er wordt echter grote vooruitgang geboekt op het AI-gebied met *computer vision*. *Computer vision* stelt computers en systemen in staat om belangrijke informatie uit digitale beelden, video's en andere visuele media te halen. Met deze informatie kunnen dan bijvoorbeeld aanbevelingen worden gedaan of kan actie worden ondernomen.

Detectietechnologie gebaseerd op *computer vision* wordt in onderzoek al vrij veel toegepast in allerlei industriële scenario's, om bijvoorbeeld defecten op te sporen en het type product te identificeren. In onderzoek vaak gebruikte *supervised* classificatiealgoritmes (classificatiealgoritmes die gebruik maken van data waarin een koppeling bestaat tussen input en output; gelabelde data) binnen *computer vision* zijn *support vector machines* (SVM's), *decision trees*, *random forests*, ANN's en *deep learning network methods* (Diete et al., 2017). Het voert hier te ver om al deze algoritmes nader te beschrijven. Maar uit de resultaten van deze onderzoeken blijkt dat het uitgangspunt van *supervised* classificatiealgoritmes (waarbij wordt gewerkt met *labeling*) voor optimalisatie ernstig beperkt is. LeCun et al. (2015) deden daarom onderzoek met *unsupervised* classificatiealgoritmes (die niet beschikken over gelabelde data). Uit dit onderzoek kwam naar voren dat deze *unsupervised* classificatiealgoritmes goede kansen bieden. *Computer vision* biedt zeker kansen om de status van een warehouse te bepalen, maar vraagt om nog meer onderzoek voordat het kan worden ingezet voor het verbeteren van de logistieke efficiëntie.



Slimmere warehouses door innovatieve technologie

Bij *smart warehouses* kan AI dus een belangrijke rol spelen. Van de vele organisaties die actief innovatieve praktijken nastreven, lopen ondernemingen met e-commerce, zoals webwinkels, voorop. E-commerce is elektronische handel en bestaat uit transacties via het internet. Deze ondernemingen maken steeds meer gebruik van AI om hun warehouseprocessen te optimaliseren. In dergelijke warehouses is sprake van volledig geautomatiseerde pick-up en levering van goederen en monitoring van de status van het warehouse. Met nieuwe technologie, zoals IoT, AI, blockchain, big data en robotica hebben warehouses een radicale verandering ondergaan.

Als voorbeeld kan Alibaba worden genoemd. Deze Chinese onderneming heeft het grootste *smart warehouse* ter wereld. Dit *smart warehouse* is uitgerust met 60 robots die ongeveer 70% van alle warehouseprocessen voor hun rekening nemen (Pickering, 2017). Er wordt geclaimd dat deze robots hebben gezorgd voor een drie keer zo hoge output, doordat zij uitgerust zijn met wifi-technologie, zelfopladende accu's en laserdetectie om botsingen te voorkomen.

Het Franse bedrijf Exotec heeft warehouse-robots ontwikkeld die *high level order picking* (HLOP) kunnen uitvoeren door stellingen op te klimmen, orders te selecteren en deze te transporteren. Deze robots, bekend onder de naam Skypods, maken gebruik van AI en laserscannernavigatie om orders te verwerken en zijn momenteel in bedrijf bij een Frans detailhandelsbedrijf (Pickering, 2017).

Ook verschillende organisaties in het Verenigd Koninkrijk streven naar steeds meer operationele excellentie binnen warehouses. Bijvoorbeeld Ocado maakt gebruik van een volledig geautomatiseerd warehouse. Dit warehouse is ontworpen om het aantal menselijke medewerkers sterk te verminderen door te investeren in honderden robots.

AI wordt dus al in ruime mate wordt toegepast in *smart warehousing*. Hierbij valt echter op dat een groot deel van het onderzoek en de toepassingen zich richten op robotisering van de warehouses. In veel mindere mate is onderzoek gedaan naar de toepassingen van AI voor bijvoorbeeld het bepalen van de real-time status van het warehouse (inventarisatie). Ook hier kan AI-technologie, zoals *computer vision* goede diensten bewijzen. In het volgende hoofdstuk leg ik uitgebreid uit hoe *computer vision* kan worden ingezet om de status van een warehouse op een betrouwbare en efficiënte manier te bepalen.

2.6 Predictive maintenance

Voor duurzame en efficiënte logistieke processen is bedrijfszekerheid van de assets van groot belang. Wanneer er bijvoorbeeld een transportmiddel of een robot (in de onbemande warehouses) uitvalt, heeft dit een negatieve impact op de efficiëntie van de logistieke keten. Daarom is goed onderhoud van deze assets belangrijk. Omdat onderhoud tijd en geld kost, speelt efficiëntie in het onderhoud een belangrijke rol. Tegelijkertijd ligt hier ook een kans voor het verduurzamen: langer gebruiken van assets verkleint de afvalberg.

Predictive maintenance (ook wel online monitoring, *condition-based monitoring* of *risk-based maintenance* genoemd) is een mogelijke oplossing voor dit vraagstuk. Het gaat er hierbij om dat onderhoud zo wordt ingezet dat de assets zo optimaal mogelijk overeind blijven. Lange tijd was de digitaliseringsgraad van het onderhoud laag. Daar

komt langzaam verandering in en daarmee komt het voorspellen van slijtage en het benodigde onderhoud aan de orde.



Voorspellen van defecten door slimme algoritmes

Als assets defect dreigen te raken, kan dit vaak gedetecteerd worden door te kijken, te luisteren en te voelen of alles het nog goed doet. Dat is op zijn minst een gebrekkige manier van controleren omdat deze foutgevoelig is. Deze manier van controleren werd vervangen door periodiek verplicht onderhoud, maar dat leidde tot preventief (onnodig) onderdelen vervangen. Gelukkig zijn steeds vaker sensoren beschikbaar die de menselijke zintuigen kunnen vervangen bij het waarnemen van de degradatie van de kwaliteit van assets. Deze sensoren zijn preciezer en accurater in hun waarneming en maken het periodiek onderhoud overbodig. Met het integreren van deze sensoren in technieken van *predictive maintenance* voorkomen bedrijven dat onderdelen onnodig worden vervangen en kunnen ze kosten besparen en de veiligheid en beschikbaarheid van de assets verbeteren.

Periodiek en hands-on onderhoud is foutgevoelig en daardoor niet erg betrouwbaar. In de meeste gevallen kan worden gesteld dat *predictive maintenance* leidt tot een verbetering van de betrouwbaarheid. Dit geldt niet alleen bij oudere assets, maar tijdens de gehele levensduur van een asset. Door het toepassen van *predictive maintenance* kunnen bedrijven een betere inschatting maken van de degradatie van de kwaliteit van hun assets en defecten vroegtijdig opsporen. Dit leidt ertoe dat ze vroegtijdig onderhoud kunnen uitvoeren, met als gevolg minder uitval van assets en

verstoringen in de keten. Ondanks dat de voordelen van *predictive maintenance* bekend zijn, is op tijd gebaseerd en hands-on onderhoud nog steeds de norm. Nog steeds maakt 30% van alle organisaties geen gebruik van *predictive maintenance* (Hashemian, 2010).

Er zijn drie vormen van *predictive maintenance* te onderscheiden, uitgaande van de gebruikte data. De eerste vorm van *predictive maintenance* gebruikt data uit sensoren die bijvoorbeeld temperatuur, druk en doorstroming meten. De gevonden waarden worden vergeleken met de vereiste waarden; eventuele afwijkingen daarop kunnen wijzen op problemen.

De tweede vorm van *predictive maintenance* maakt gebruik van data uit (vooral draadloze) sensoren die bijvoorbeeld vibratie (*accelerometers*) of lekkages (akoestische sensoren) meten. Met deze data worden degradatie in de tijd en overschrijding van de vereiste waarden waargenomen.

De derde vorm van *predictive maintenance* maakt gebruik van data uit sensoren en testsignalen. Met deze signalen wordt getest of de apparatuur nog goed werkt in verschillende omstandigheden. Hiermee worden defecten zoals scheuren, corrosie of slijtage gesignaleerd.

Predictive maintenance kent een brede variëteit van statistische en AI-technieken. Elk van deze technieken heeft eigen karakteristieken en toepassingen. De algoritmes van *machine learning* (ML) kunnen worden toegepast in verschillende fasen van *predictive maintenance*. Voorbeelden hiervan zijn het stellen van diagnoses, doen van prognoses en inschatten van de resterende levensduur. *Predictive maintenance* is pas sinds 2016 in opkomst. Het is een complexe opgave en tot op de dag van vandaag wordt er onderzoek gedaan naar de best werkende vorm van *predictive maintenance*.

Verschillende onderzoekers hebben ANN's gebruikt om problemen met *predictive maintenance* te ondervangen, in veel gevallen gecombineerd met andere modellen, zoals SVM's (Li et al., 2017; Crespo Márquez et al., 2019; Chen et al., 2020). In alle gevallen was de inzet van een ANN-model erop gericht om een voorspelling te doen of om fouten in systemen te detecteren. Hierbij werd data ingezet in verschillende omstandigheden waarin de apparatuur moest blijven functioneren. De resultaten uit de onderzoeken laten zien dat het mogelijk is om de toekomstige condities van machines te voorspellen en daarmee de resterende levensduur te verlengen.

Andere onderzoekers hebben gebruik gemaakt van RNN's (zie voor een uitleg het voorgaande). Zowel Rivas et al. (2019) als Cachada et al. (2018) gebruikten in hun onderzoek een *long short-term memory* (LSTM) RNN-model voor het voorspellen van

defecten. Beide modellen werden toegepast omdat zij de mogelijkheid bieden om tijdreeksdata te gebruiken voor het voorspellen van de toekomst.

Zoals opgemerkt werken onderzoekers op allerlei fronten met inzet van allerlei modellen aan de ontwikkeling van *predictive maintenance*. Ik noem nog een paar modellen die ze gebruiken: ML-modellen, *autoregressive moving average* (ARMA), *autoregressive integrated moving average* (ARIMA) en *decision trees*. Dit onderzoek wordt gedaan in verschillende landen met steeds net iets andere uitgangspunten en resultaten, maar allemaal gericht op het principe van *predictive maintenance*, defecten detecteren en voorspellen (Schmidt & Wang, 2018; Zhou & Tham, 2018; Chukwueke et al., 2016; Adhikari et al., 2018).

De verwachting is dat *deep learning* in de toekomst steeds meer aandacht zal krijgen in de context van *predictive maintenance*. Hierbij kan worden gedacht aan het gebruiken van *convolutional neural networks* (CNN's) om features uit databases te extraheren zonder dat er van tevoren kennis van de data aanwezig hoeft te zijn. Een CNN is een type ANN dat vaak wordt gebruikt voor beeldherkenningstaken. Het werkt door het toepassen van een proces genaamd convolutie op de invoer van een afbeelding om kenmerken op verschillende niveaus te extraheren. Bij het gebruik van een CNN worden er meerdere lagen toegevoegd aan het netwerk. In de eerste laag worden kleine stukjes van een afbeelding geanalyseerd om basiskarakteristieken te vinden, zoals randen of hoeken. Daarna volgen er meerdere lagen waarin steeds meer abstracte kenmerken worden geïdentificeerd, zoals objecten of patronen. Het proces van convolutie houdt in dat er een filter (kernel) over de afbeelding wordt geschoven om de kenmerken te vinden. Deze filter werkt als een soort venster waarmee je kijkt naar een klein stukje van de afbeelding. Het resultaat van de convolutie wordt vervolgens doorgegeven aan de volgende laag, waar weer een nieuwe filter wordt gebruikt om meer complexe kenmerken te vinden.

Exemplarisch is het onderzoek van Yuan et al. (2018) waarin zij het ontdekken van nieuwe features automatiseerden om defecten te kunnen detecteren en te voorspellen.

Een andere interessante aanpak is het gebruik van *deep learning* voor anomalie-detectie. In deze context gebruikten De Vita et al. (2020) een *autoencoder* bestaande uit een *deep neural network* (DNN), om het aantal dimensies in de data te reduceren. Zo kon een nieuwe dataset worden gegenereerd, die weer te gebruiken is voor het trainen van detectie-algoritmen, zoals *k-means*.

Uit het voorgaande kan worden geconcludeerd dat er veel onderzoek is uitgevoerd naar het toepassen van AI voor *predictive maintenance*. Het valt echter op dat het meeste onderzoek zich richt op het voorspellen van defecten. Dat is op zich een logische

focus, maar om een goede verbeterslag te maken in het optimaal inzetten van assets, is een goede kwaliteit van de data die gebruikt wordt voor de voorspelling essentieel. Immers, voor het kunnen doen van accurate voorspellingen is goede en betrouwbare data nodig. Er is echter wel data beschikbaar over het normaal functioneren, maar bijna geen data over het ontstaan van defecten of defecten zelf. En om echt goede voorspellingen te doen, is die informatie cruciaal. Er is maar heel weinig onderzoek te vinden naar de toepassing van AI-technologie om juist de datakwaliteit te verbeteren en de schaarste te verminderen, terwijl dit dus cruciaal is. In het volgende hoofdstuk licht ik toe hoe mijn lectoraat hieraan aandacht gaat besteden.

Naar duurzame logistiek met AI

3.1 Inleiding

In het vorige hoofdstuk heb ik besproken dat er al veel onderzoek is gedaan naar het optimaliseren van strategische en tactische logistieke processen en in het bijzonder naar het optimaliseren van de locatie van warehouses en van distributieroutes. Daarnaast is er al veel onderzoek gedaan naar het voorspellen van de transportvraag, *smart warehousing* en *predictive maintenance*, waarvoor vele verschillende modellen zijn ontwikkeld.

Opvallend is dat onderzoekers AI slechts mondjesmaat toepassen. Indien er wel sprake is van het gebruik van AI, dan is dat meestal in de vorm van *artificial neural networks* (ANN's) voor het doen van voorspellingen, bijvoorbeeld van de transportvraag. De reden van het in onderzoek veelvuldig toepassen van ANN's is drieledig. In de eerste plaats bestaan ANN's al vrij lang in AI-land. Het is namelijk een van de oudste algoritmes (Ahmad et al., 2014). In de tweede plaats zijn ANN's vrij succesvol gebleken in het voorspellen van allerlei grootheden. In de derde plaats zijn ANN's behoorlijk flexibel (Tu, 1996). Deze techniek kan verschillende typen variabelen gebruiken en interacties tussen deze variabelen.

Voor de optimalisatie van de verschillende logistieke processen, en dan vooral bij de optimalisatie van warehouselocaties en routes voor transportmiddelen, maken bedrijven en onderzoekers met name gebruik van meer traditionele OR-methoden, zoals *linear programming* en heuristische benaderingen. Deze methoden vragen dikwijls veel rekenkracht en zijn minder goed dan AI-methoden in staat om snel en real-time resultaten te genereren, vooral in situaties met veel verschillende of complexe factoren.

Tegelijkertijd biedt AI goede mogelijkheden voor optimalisatie. De zoektocht naar de optimale oplossing met AI is gebaseerd op het concept van het leren van data, in plaats van op OR-theorieën. De verwachting is dat als AI-modellen eenmaal door middel van data zijn getraind, deze modellen veel sneller zullen presteren dan OR-modellen. Dit speelt vooral omdat veel situaties, bijvoorbeeld planning, complex zijn en uitgebreide berekeningen vragen. Als voorbeeld heb ik de dynamische routing van transportmiddelen genomen. Dynamische routing vraagt vaak om re-optimalisatie. Dit vergt veel rekenkracht. Om dergelijke problemen op te kunnen lossen, stel ik voor om te onderzoeken in hoeverre hier bijvoorbeeld *reinforcement learning* kan worden gebruikt in combinatie met *deep learning*.

Reinforcement learning is een type *machine learning* dat zich richt op het aanleren van een computerprogramma om bepaalde taken uit te voeren door middel van *trial - and - error*. Het programma ontvangt feedback, ook wel een beloning of straf genoemd, na elke actie die het uitvoert en past zijn acties aan om een hogere beloning te behalen. Het idee achter *reinforcement learning* is vergelijkbaar met hoe we als mensen leren. Als we bijvoorbeeld leren fietsen, krijgen we feedback van onze omgeving (bijvoorbeeld wanneer we vallen) en passen we onze bewegingen aan om beter te worden in fietsen. In hetzelfde opzicht leert een machine in *reinforcement learning* door feedback te ontvangen en zijn gedrag aan te passen om de beloning te maximaliseren.

Gegeven de toename in het aantal toepassingen van AI en de toenemende hoeveelheid beschikbare data in de logistiek, is AI in de logistiek een vruchtbaar onderzoeksgebied, juist ook in gebieden die nader bekeken zijn in het vorige hoofdstuk. Daarbij is aandacht nodig voor vier factoren.

In de eerste plaats moet onderzoek doorgaan op het combineren van *deep learning* met andere technieken. Het combineren van verschillende methoden leidt tot goede resultaten. Hierbij valt te denken aan het ontwikkelen van nieuwe methoden van *ensemble learning*. *Ensemble learning* is een *machine learning* techniek waarbij meerdere modellen samenwerken om betere voorspellingen te doen dan elk model afzonderlijk zou kunnen doen. Het idee is dat door de krachten te bundelen van verschillende modellen die mogelijk verschillende zwaktes en sterke punten hebben, het ensemble als geheel betere resultaten kan behalen. Een voorbeeld van *ensemble learning* is wanneer je verschillende classificatiemodellen combineert om een voorspelling te doen over een bepaalde dataset. Elk model kan bijvoorbeeld verschillende kenmerken van de set onderzoeken en op basis daarvan een voorspelling doen. Door deze voorspellingen te combineren, kan het ensemble als geheel betere resultaten bereiken dan elk afzonderlijk model. Voorbeelden van *ensemble learning* zijn *random forests*, *gradient boosting machines* combinaties met *reinforcement learning*.

In de tweede plaats is er meer onderzoek nodig op het gebied van het voorspellen van acties door middel van AI en dan vooral op het vraagstuk op welke manier AI-technieken de bestaande OR-technieken kunnen complementeren of vervangen. *Reinforcement learning* kan hierin een mooie rol spelen, omdat deze techniek juist gericht is op optimalisatie van de efficiënte in een dynamische omgeving. In het verlengde hiervan moet meer onderzoek worden verricht waarin de oplossingen die meer traditionele OR-technieken bieden, worden vergeleken met de oplossingen met AI-technieken. Het gaat hier dan met name om het vergelijken van de kwaliteit van de oplossing en de benodigde rekentijd. Met meer inzicht in de voor- en nadelen van AI en OR, kan worden ingezet op de voordelen van zowel AI als OR, om zodoende nieuwe methodologieën te

ontwikkelen die de twee gebieden samenvoegen voor in het bijzonder het oplossen van optimalisatieproblemen.

In de derde plaats spelen het type, de omvang en de kwaliteit van de data een grote rol bij de toepasbaarheid van AI-methoden voor een specifiek probleem. Daarom is onderzoek nodig om te achterhalen in welke mate de verschillende AI-technieken afhankelijk zijn van de karakteristieken van data in relatie tot een specifiek probleemtype. Hiernaast is onderzoek nodig naar de manier waarop AI-technieken kunnen bijdragen aan het verbeteren van de kwaliteit van data.

De afhankelijkheid van data komt tot uitdrukking in de kwaliteit van de oplossing en de tijd die nodig is om een oplossing voor het probleem te vinden. Onderzoek naar de afhankelijkheid van data voor de verschillende AI-technieken leidt tot een beter inzicht in de toepasbaarheid van deze verschillende technieken. Dit betreft de oplossingen voor verschillende problemen in de logistiek en de gevoeligheid van deze technieken voor het type data, de omvang van het probleem en het type probleem.



AI en mensen gaan door de afhankelijkheid van data hand in hand

Ten vierde wordt AI nog onvoldoende ingezet om de duurzaamheid binnen de logistiek te verbeteren. Bij traditionele OR-methoden wordt duurzaamheid in de regel niet

betrokken in het optimalisatievraagstuk. Dit heeft voor een groot deel te maken met het feit dat het toevoegen van duurzaamheid als factor, het model nog complexer maakt. Bestaande OR-methoden zijn hiervoor dikwijls niet krachtig genoeg. Dat geldt vooral als resultaten op zeer korte termijn (bijvoorbeeld *near real-time* of *real-time*), beschikbaar moeten zijn, bijvoorbeeld de nieuwe optimale route voor een vrachtwagen nadat er een ongeluk op de route heeft plaatsgevonden.

In de rest van dit hoofdstuk presenteer ik de onderzoekagenda voor mijn lectoraat.

3.2 Onderzoek naar optimalisatie van de locatie van warehouses en hubs met AI

In hoofdstuk 2 heb ik de bestaande onderzoeken besproken op het gebied van optimalisatie van strategische en tactische processen, zoals bij de keuze van de locatie van een warehouse. Onderzoekers maken bij deze processen met name gebruik van meer traditionele OR-methoden, zoals *linear programming*. Ik heb aangegeven dat deze methoden belangrijke nadelen hebben, zoals dat ze veel rekenkracht vergen en niet zo goed kunnen omgaan met een veelheid aan of complexe factoren. Daarnaast nemen onderzoekers duurzaamheid vaak niet als factor mee bij de optimalisatie van tactische en strategische processen.

In mijn lectoraat wil ik mij in het kader van optimalisatie van strategische en tactische processen in de logistiek met name richten op het inzetten van AI bij het kiezen van de optimale warehouse- en hublocaties. Een probleem bij de keuze van een locatie is dat producten op een bepaalde locatie worden geproduceerd en vervolgens naar warehouses worden gebracht, waarbij zowel de faciliteit die de producten produceert als de warehouses een beperkte capaciteit hebben. Het gebruik van warehouses gaat gepaard met vaste kosten, terwijl het vervoeren van de producten van de producerende faciliteit naar het warehouse en vanaf het warehouse naar de afnemers gepaard gaat met variabele kosten.

Het doel van mijn onderzoek is om – gegeven de locatie van de producerende faciliteiten en van de afnemers, en dus de routes – op een gegeven locatie van het warehouse de vaste en met name de variabele kosten te minimaliseren. Onder variabele kosten versta ik in het onderzoek ook maatschappelijke kosten, zoals de impact op het milieu en daarmee de duurzaamheid.

Voor het kiezen van de optimale warehouselocatie maak ik in mijn lectoraat onder andere gebruik van *reinforcement learning* in combinatie met neurale netwerken. Hiermee ondervang ik dat ik de juiste waarden voor de parameters zou moeten kiezen, wat een probleem is voor de meeste algoritmes die gebruik maken van 'leren'. Bij meer

traditionele methoden worden deze waarden vaak empirisch vastgesteld door het uitvoeren van een aantal trials.

In algoritmes van het conventionele *reinforcement learning* wordt een zogenaamde *reinforcement learning agent* verbonden aan een omgeving, door middel van waarnemen en actie. Een *reinforcement learning agent* is een actor die interacteert met de omgeving en een 'beleid' kan aanleren. Dit beleid bepaalt welke actie de agent onderneemt. Na elke actie ontvangt de agent input over de actuele staat van de omgeving en kiest dan een actie om deze staat ten goede te veranderen. De agent ontvangt feedback na iedere actie (zie ook het voorgaande) en gebruikt deze feedback om zijn gedrag aan te passen (en dus een andere actie te kiezen). Het doel is om te bepalen welke acties de kosten minimaliseren of een beloning te maximaliseren.



Door slim strategisch te plannen alles optimaal verbinden

Voor het bepalen van de juiste set van acties wil ik neurale netwerken gebruiken. De input van het neurale netwerk bestaan dan uit de set van alle individuele acties van de agent uit het verleden, en de output bestaat uit de te nemen actie door de agent. Op deze manier kunnen verschillende locaties (acties) worden geprobeerd en wordt de agent (die de beste locatie zoekt), door het vergaren van steeds meer data, steeds slimmer.

Ik verwacht dat op deze manier een locatie kan worden gekozen met de minste kosten en er tegelijkertijd de duurzaamheid positief wordt beïnvloed.

3.3 Onderzoek naar optimalisatie van distributieroutes met AI en cyber-fysieke systemen

Uit hoofdstuk 2 blijkt dat er al enig onderzoek is gedaan naar optimalisatie van distributieroutes, waarbij de rol van IoT ook regelmatig is onderzocht. Met IoT kunnen de gekozen routes van de transportmiddelen real-time worden gemonitord. Dan heeft de organisatie een sturingsmechanisme waarmee zij niet alleen de efficiëntie kan verbeteren, maar ook de impact van haar logistiek op de omgeving kan sturen en dus de logistieke duurzaamheid verbeteren.

De logistiek, waaronder de distributie, is verantwoordelijk voor een groot deel van de kosten in het totale proces van fabricage tot consumptie van goederen. Als distributieroutes goed zijn gearrangeerd, heeft dat een grote positieve impact op de snelheid, de kosten en de efficiëntie van de distributie. Dit is in het bijzonder relevant in de huidige tijd waarin het aantal voertuigen op de weg sterk toeneemt en de wegen dichtslibben.

De sleutel hiertoe is de optimalisatie van de logistieke en dus distributieroutes (Tang et al., 2021). Optimalisatie van de routes van vrachtvoertuigen kan de economische efficiëntie en duurzaamheid verbeteren en een meer rationele en efficiënte logistiek bewerkstelligen. Onderzoek naar logistieke en routeoptimalisatie is de basis voor het ontwikkelen van een meer intelligente logistiek en intelligente regulering van transport (Świechowski et al., 2015).

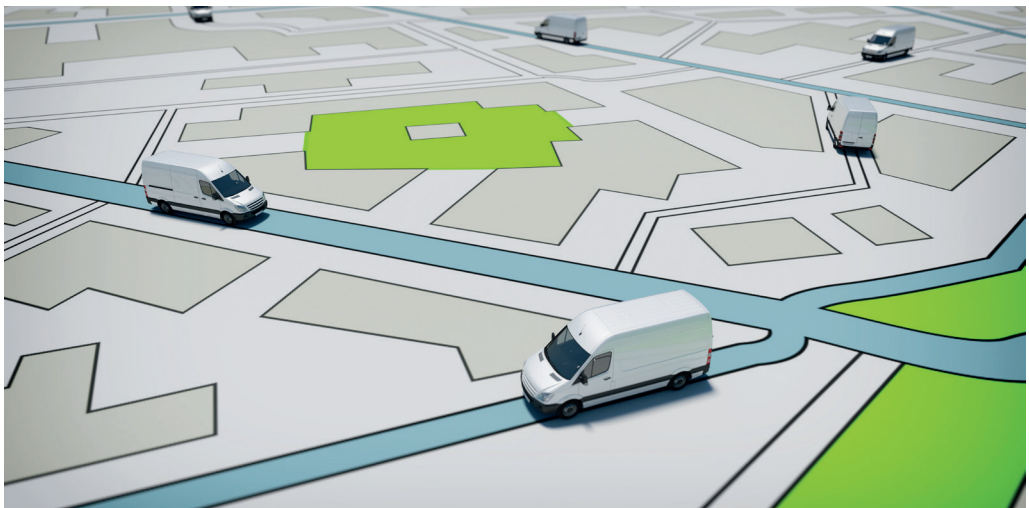
Het routeringsprobleem kan worden gezien als een uitbreiding van een simpel voertuigrouteringsprobleem. Deze uitbreiding houdt rekening met twee aspecten. Ten eerste is er het spatio-temporele karakter van het transport; dat betreft de omstandigheden van het voertuig in ruimte en tijd. Ten tweede zijn er de real-time vereisten van de klant, die een sterke relatie hebben met de verkeersomstandigheden (Zhao et al., 2007). Er is immers niet zelden sprake van een vastgestelde tijd waarbinnen vracht moet worden afgeleverd. Fraix-Burnet et al. (2015) hebben in dit kader clustering-algoritmes gecombineerd met *genetic algorithms* (zie ook het voorgaande) om te onderzoeken onder welke omstandigheden transportmiddelen kunnen voldoen aan de vereisten in tijd en ruimte.

Door middel van het combineren van AI methoden met sensoren (in het kader van cyber-fysieke systemen) moet het mogelijk zijn om real-time inzicht te krijgen in de condities die van invloed zijn op de duurzaamheid van de verschillende route-alternatieven.

Binnen mijn lectoraat ga ik het onderzoek richten op het genereren van de optimale routes met behulp van AI- en deep learning-modellen. Doelstelling van het gebruik van deze modellen zal zijn om de druk op het milieu zoveel mogelijk te verminderen. Technologieën met *deep learning* zijn sterk in ontwikkeling en de toepassingsgebieden steeds uitgebreider. *Deep learning* is een zeer krachtig techniek, waarbij het model in staat is om elk redelijk gedrag aan te leren.

De vraag naar transport van klanten en de omstandigheden in het verkeer veranderen steeds. Daarom is het op training gebaseerde onderzoek van *deep learning* een betere methode voor de optimalisatie van logistieke en dus distributieroutes dan de meer traditionele methoden.

Bij het onderzoek naar het inzetten van AI en *deep learning* zal ik rekening houden met veel verschillende dynamische factoren, zoals verkeerscondities en weerscondities. Hierbij zal ik verder uitdrukkelijk gebruik maken van cyber-fysieke systemen (IoT).



Slimmere dynamische routes met AI

3.4 Onderzoek naar het betere voorspelling van de transportvraag met AI

In hoofdstuk 2 heb ik laten zien dat er veel onderzoek is gedaan naar het gebruik van statistische en machine learning-modellen voor het voorspellen van de transportvraag. Uit de literatuur komt naar voren dat daarbij verschillende methoden zijn toegepast, zoals ANN's en SVM's, maar ook meer traditionele methoden, zoals *time series analysis*. *Time series analysis* is een statistische techniek die wordt gebruikt om patronen en

trends te identificeren die over een bepaalde periode zijn verzameld, zoals bijvoorbeeld temperatuurmetingen of verkoopcijfers. Het is een methode om gegevens te analyseren die in de tijd zijn verzameld en waarbij de volgorde van gegevens belangrijk is. Bij *time series analysis* wordt gekeken naar de veranderingen in de data over tijd en wordt geprobeerd om voorspellingen te doen over toekomstige waarden. Dit kan bijvoorbeeld gebruikt worden om te voorspellen hoe de verkoopcijfers zich zullen ontwikkelen in de toekomst of om te bepalen wat de gemiddelde temperatuur zal zijn in een bepaalde periode. Om *time series analysis* te doen worden verschillende technieken gebruikt, zoals trend analysis, seizoensgebondenheid en regressieanalyse. Deze technieken helpen bij het identificeren van patronen en trends in de data.

Ook heeft de wetenschap zich voor een groot deel gericht op het inzetten van hybride modellen, dus modellen die verschillende methoden combineren. Met name deze hybride modellen blijken redelijk goed in staat om de transportvraag te voorspellen. Echter ook is duidelijk geworden dat een groot deel van deze methoden minder goed kunnen omgaan met de complexiteit van de transportvraag. Dit is onder andere goed te zien bij onverwachte gebeurtenissen; zo bleken tijdens de coronapandemie de bestaande modellen ineens niet meer goed te functioneren. Er zijn dus meer geavanceerde modellen nodig.

Daarnaast wordt het milieu nu onnodig belast, doordat de inefficiëntie leidt tot onnodig leegrijden. Zo wordt een groot deel van de containers in de Rotterdamse haven leeg rondgereden. Meestal gaat het hierbij om inter-terminal transport, dus transport in het havengebied zelf, maar alles bij elkaar leidt dat tot een flinke belasting van het milieu en vergroot het de kans op congestie. Het zou een significante verbetering van de logistieke duurzaamheid betekenen als dit inefficiënte element wordt geminimaliseerd.

Deeplearning-technieken bieden de kans om de transportvraag accuraat te voorspellen (*demand forecasting*). Dit blijkt uit onderzoek naar *deep learning* in andere gebieden dan de logistiek. In onderzoek naar *demand forecasting* werden bijvoorbeeld *recurrent neural networks* (RNN's) ingezet. Een RNN maakt gebruik van sequentiële informatie, dus informatie die opeenvolgend wordt gegeven (Cho et al., 2014). In een RNN (zie ook het voorgaande) wordt selectief informatie door het netwerk heen gevoerd over de verschillende tijdstappen, terwijl de verschillende data-elementen verwerkt worden. Deze karakteristieken zijn cruciaal bij het voorspellen van de vraag waarbij juist de informatie die gerelateerd is aan de tijdstappen, cruciaal is. De RNN wordt regelmatig aangevuld met een LSTM-netwerk (*long short term memory*), dat fungeert als een soort geheugen voor het neurale netwerk. Het LSTM-netwerk is speciaal ontworpen om patronen en verbanden te identificeren in gegevensreeksen die in de tijd veranderen, zoals bijvoorbeeld spraak, tekst of tijdreeksen. Het bijzondere van LSTM is dat het in

staat is om informatie op te slaan over een lange periode, en tegelijkertijd ook oude informatie te vergeten die niet meer relevant is voor de huidige voorspelling. Hierdoor kan het model beter omgaan met complexe gegevensreeksen. LSTM werkt door informatie te onthouden in speciale geheugencellen en deze cellen te voorzien van input, output en *forget* gates. De input gate bepaalt welke informatie in de geheugencel wordt opgeslagen, de output gate bepaalt welke informatie uit de cel wordt gehaald en de *forget* gate bepaalt welke informatie uit de cel wordt verwijderd.

Een onderzoek dat RNN's gebruikt, is dikwijls gericht op de zogenaamde sporadische (of: intermitterende) vraag. Er is sprake van een sporadische vraag naar een product wanneer de vraag in verschillende perioden nul is. Sporadische vraag komt vooral voor op lage aggregatieniveaus, zoals het SKU-niveau (Stock Keeping Unit), en bij producten met een lage verkoopfrequentie (zoals reserveonderdelen, zware productiemachines of in het algemeen dure en onregelmatig gevraagde producten). Juist hier lijken RNN's goed te functioneren.

Ik wil mijn onderzoek richten op de inzet van AI en met name *deep learning* voor het voorspellen van de transportvraag. Hierbij richt ik mij op het verbeteren van de efficiëntie, maar vooral op het verminderen van de milieubelasting door onnodige vervoersbewegingen. Binnen de te ontwikkelen modellen kan dan rekening worden gehouden met verschillende factoren, zoals de economische ontwikkeling en andere externe gebeurtenissen. Wanneer het mogelijk is om de transportvraag accuraat te voorspellen, kan het onnodig inzetten van transportmiddelen en bijvoorbeeld leegrijden worden voorkomen, hetgeen de duurzaamheid van de logistiek ten goede komt.

3.5 Onderzoek naar smart warehousing met AI

In hoofdstuk 2 heb ik aangegeven dat het energieverbruik van traditionele warehouses met name ligt in de opslag van de goederen en de stroom van de goederen. Om te weten welke producten zich in het warehouse bevinden en wat de restcapaciteit is, moeten deze elementen geïnventariseerd worden. De bestaande technieken voor identificatie van de status van de voorraad vergen vaak nog te veel handwerk of zijn duur of bevattelijk voor storingsen en verminderde stabiliteit. En hoewel er grote vooruitgang wordt geboekt met *computer vision*, kent dat nog wel classificatieproblemen. Bij classificatieproblemen gaat het om het kunnen bepalen van een categorie op basis van kenmerken. Classificatiealgoritmes maken deze techniek dus iets minder geschikt voor het identificeren van de status van het warehouse. De onbemande super-hightechbedrijven waar AI ingezet wordt in *smart warehousing*, zijn volledig gericht op robotisering maar veel minder op de real-time status van het warehouse.

Omdat met een accurate real-time informatie over de status van een warehouse de energievoorziening heel precies kan worden afgestemd op de inhoud, (hoeveelheid en wellicht type goederen) draagt kennis op dit vlak bij aan de verduurzaming van de logistieke sector. Op dit moment wordt er veel energie verspild aan systemen in het warehouse die op bepaalde momenten helemaal niet nodig zijn en uitgeschakeld kunnen worden. Mijn onderzoek richt zich erop om met behulp van *deep learning* in combinatie met *computer vision* te komen tot een real-time statusmodel voor warehouses.



Accuraat en up-to-date inzicht in de status van een warehouse met computervision

Deep learning networks kunnen het probleem van de classificatiealgoritmes bij *computer vision* oplossen en kunnen een heel beeld (dus inclusief alle belangrijke elementen) classificeren. Uit de literatuur komt dan ook naar voren dat deze netwerken een goede oplossing zijn voor classificatie binnen het gebied van *computer vision*. Bijvoorbeeld Karungaru et al. (2021) hebben een verbeterde AlexNet-oplossing voorgesteld voor het detecteren van voertuigen en het classificeren van auto's. AlexNet is een deep learning neurale netwerk dat gebruikt wordt voor beeldherkenning en classificatie. Het is ontworpen om te leren van grote hoeveelheden afbeeldingen en kan daardoor objecten, mensen, dieren en andere elementen herkennen op basis van visuele kenmerken. AlexNet heeft een belangrijke rol gespeeld in de ontwikkeling van deep learning en heeft de weg vrijgemaakt voor andere geavanceerde modellen die tegenwoordig worden gebruikt in computer vision toepassingen.

Li et al. (2019) lieten verder zien dat met behulp van een *convolutional neural network* (CNN) pallets in een warehouse effectief kunnen worden geïdentificeerd. De accuraatheid van het gebruikte algoritme is erg hoog, namelijk 92,7%. Ook is het algoritme in staat om veel beelden in een korte tijd te classificeren. Zhao et al. (2020) stelden een ResNet-50 diagnosesysteem voor om afwijkingen op een ander gebied, namelijk in de borst, te diagnosticeren. Het voorgestelde model blijkt eveneens erg accuraat te zijn. ResNet-50 lijkt in de basis veel op AlexNet. Het unieke aan ResNet-50 is dat gebruik wordt gemaakt van zogenaamde residuale blokken, die het netwerk in staat stellen om diepere lagen van het netwerk te doorlopen zonder prestatieverlies. Hierdoor kan het neurale netwerk beter presteren dan andere netwerkarchitecturen met een vergelijkbaar aantal lagen.

Dit laat zien dat *deep learning* detectiealgoritmes niet alleen een hoge accuraatheid hebben, maar ook een sterke weerstand tegen verstoringen vanuit de omgeving. Uitdaging is dan ook hier om een deeplearning-algoritme te ontwerpen dat in staat is om de status van de inventaris in een warehouse te detecteren. Hierbij is het van belang dat het algoritme accuraat is en snel, zodat op elk moment real-time informatie over de status van het warehouse beschikbaar is.

Het doel van mijn onderzoek naar de inzet van *deep learning* bij het automatisch detecteren van de status van een warehouse is om de energievraag te beperken en dus de systemen in een warehouse zo energiezuinig mogelijk aan te sturen.

3.6 Onderzoek naar AI-gestuurd predictive maintenance

Het interessant gebied van *predictive maintenance* kent vele kansen en uitdagingen. Zo blijkt uit de literatuur zoals besproken in hoofdstuk 2, dat *predictive maintenance* in het algemeen uitdagingen kent op het gebied van de kosten voor onderhoud of voor het voorkomen van onnodig onderhoud.

Meer in het bijzonder blijkt echter nog een substantieel aantal problemen te spelen rond *predictive maintenance*. Deze problemen kunnen worden ingedeeld in twee hoofdgroepen, namelijk problemen die zijn gerelateerd aan 1) big data en 2) de AI-modellen zelf.

Bij de big data is het eerste probleem dat er real-time monitoring van de assets moet plaatsvinden en dat dat grote hoeveelheden data oplevert. Het gebruik van grote hoeveelheden data brengt met zich mee dat er veel van de capaciteit van computersystemen wordt gevraagd en dat de verwerkingssnelheid al snel substantieel toeneemt. Zhou en Tham (2018) hebben daarom voorgesteld om *edge computing* in te zetten. Edge computing verwijst naar het verwerken en opslaan van gegevens op

apparaten die zich dicht bij de rand van een netwerk bevinden in plaats van op een centrale server of in de cloud. Dit wordt gedaan om de latentie te verminderen en de prestaties te verbeteren door de verwerking en analyse van gegevens zo dicht mogelijk bij de bron te brengen. Apparaten die vaak worden gebruikt voor *edge computing* zijn onder andere smartphones, routers, IoT-apparaten en andere slimme apparaten. In ieder geval zijn er op AI gebaseerde technieken nodig die het omgaan met grote hoeveelheden data efficiënter maken.

Een volgend probleem binnen big data in relatie tot *predictive maintenance* betreft de datakwaliteit en -interpretatie. In veel van de verzamelde data missen een groot aantal waarden, is de data slecht gestructureerd of is de data niet goed of helemaal niet geannoteerd. Om met dit probleem om te gaan, hebben Hegedüs et al. (2018) als oplossing voorgesteld om data te pre-processen en door deze bewerking van de data deze geschikt te maken voor *predictive maintenance*. Deze methode is echter te weinig generiek om op verschillende scenario's en databronnen te kunnen worden toegepast. De uitdaging hier is dus om algoritmes te ontwikkelen die in staat zijn om de kwaliteit van de data zo te verbeteren dat de modellen voor *predictive maintenance* accurater worden.

Het probleem gerelateerd aan AI-modellen betreft het verkrijgen van data die de tendens van normaal functioneren naar een defect toont. De modellen worden namelijk getraind met belabelde datasets en leren daardoor problemen te identificeren. Hierbij wordt echter uitgegaan van de vooronderstelling dat gebruik wordt gemaakt van *supervised learning*. Bij *supervised learning* is het uitgangspunt dat de uitkomstwaarden bekend zijn. Het model wordt vervolgens getraind door de input af te zetten tegen deze uitkomstwaarden. De uitdaging is hier dus om te onderzoeken of het gebruik van *unsupervised learning*, zoals *anomaly detection*, soelaas kan bieden. *Anomaly detection* verwijst naar het proces van het identificeren van afwijkingen of onregelmatigheden in gegevens die kunnen duiden op potentieel schadelijk of ongewenst gedrag. Het is een methode die vaak wordt gebruikt in data-analyse en machine learning, waarbij een model wordt getraind om patronen in gegevens te herkennen en vervolgens afwijkingen te signaleren die buiten deze patronen vallen. *Anomaly detection* kan gebruikt worden in verschillende toepassingen, zoals het detecteren van fraude, het identificeren van abnormale netwerkactiviteit in cyberbeveiliging, maar ook het monitoren van de werking van machines en apparatuur om storingen te voorkomen.

Een volgend probleem met betrekking tot AI-modellen is dat er geen universele modellen beschikbaar zijn, dus modellen die toepasbaar zijn op verschillende scenario's. Ansari et al. (2020) en Xu (2019) deden al onderzoek naar dit probleem. Xu et

al. gebruikten in hun onderzoek *deep transfer learning*. *Transfer learning* maakt het mogelijk om modellen die zijn getraind in een bepaald domein, taken te laten uitvoeren in andere scenario's dan waarvoor ze oorspronkelijk getraind waren. Bij andere benaderingen wordt er juist voor gekozen om bestaande modellen toe te passen op nieuwe scenario's.

Gezien de genoemde problemen, zal het doel van mijn onderzoek op het gebied van AI-gestuurde *predictive maintenance* dan ook ten eerste gericht zijn op het ontwikkelen van enerzijds methoden die AI-modellen in staat stellen om om te gaan met grote hoeveelheden data en anderzijds AI-technieken die zijn gericht op het verbeteren van de datakwaliteit van data ten behoeve van modellen voor *predictive maintenance*. Ten tweede zal mijn lectoraat zich richten op het ontwikkelen van modellen voor *unsupervised learning* zodat het probleem van de afwezigheid van run-to-fail data kan worden ondervangen. Ten derde zal het lectoraat zich richten op het ontwikkelen van universele modellen voor *predictive maintenance*.

Om de voornoemde doelen te kunnen bereiken, zal mijn lectoraat gebruik maken van geavanceerde AI-technieken, zoals *deep learning*, *autoencoders*, *anomaly detection* en *transfer learning*. Ik verwacht dat door het gebruik van deze technieken, de kwaliteit van de modellen voor *predictive maintenance* aanzienlijk zal verbeteren. Dit zal er dan toe leiden dat meer accurate voorspellingen kunnen worden gedaan, waardoor uitval van transportmiddelen kan worden voorkomen met daarmee een belangrijke positieve impact op de efficiëntie van de logistieke keten.

Verbinding met het onderwijs

4.1 AI- en logistieke experts van de toekomst

De toekomst van de logistiek zal steeds meer gedomineerd worden door AI en de technologische ontwikkelingen die hiermee gepaard gaan. De expert van de toekomst in de logistieke sector zal dan ook sterk gepositioneerd zijn in de AI-technologieën en in staat zijn deze toe te passen in logistieke processen.

Een belangrijke vaardigheid voor de AI- en logistieke expert van de toekomst wordt het kunnen ontwikkelen en implementeren van geavanceerde AI-modellen, zoals *machine learning* en *deep learning*. Dit betekent dat de expert zich zal moeten verdiepen in de werking van deze modellen en de vereiste programmeer- en analysevaardigheden bezitten. Daarnaast moet de expert ook kennis hebben van de logistieke processen die kunnen worden geautomatiseerd of geoptimaliseerd, zodat hij of zij de AI-modellen op de juiste manier kan toepassen.

Een andere belangrijke vaardigheid van de AI- en logistieke expert van de toekomst is het kunnen analyseren van grote hoeveelheden data. Door middel van data-analyse kan de expert de logistieke processen beter begrijpen en efficiëntere oplossingen ontwikkelen. Dit vereist vaardigheden in *data science* en statistiek, evenals kennis van hoe data te verzamelen, op te slaan en te analyseren.

Naast de technische vaardigheden moet de AI- en logistieke expert van de toekomst ook sterk zijn in communicatie en samenwerking. Dit omdat de expert vaak zal werken in multidisciplinaire teams en zal moeten samenwerken met mensen van verschillende afdelingen, zoals AI, engineering en management. De expert moet ook kunnen communiceren met klanten en stakeholders, zodat hij of zij de AI-oplossingen kan 'verkopen' en uitleg kan geven over de werking ervan.

Om de voorgaande vaardigheden te kunnen verwerven, is het belangrijk dat studenten onderwijs genieten dat wordt gedreven door onderzoek. In de volgende paragrafen beschrijf ik op welke manier mijn lectoraat hieraan bijdraagt. In dit kader geef ik eerst een korte schets van het logistieke en AI-onderwijs op Hogeschool Rotterdam.

4.2 AI en logistiek in de opleidingen op Hogeschool Rotterdam

Hogeschool Rotterdam heeft zich de afgelopen jaren sterk gericht op het verbinden van onderzoek met onderwijs op het gebied van AI en logistiek. Dit heeft geleid tot een groeiende groep van experts en studenten die zich bezighouden met de ontwikkeling en toepassing van AI-technologieën in de logistieke systemen. De hogeschool biedt een aantal opleidingen aan op het gebied van AI en logistiek, die zijn gericht op het opleiden van experts op deze gebieden. Hieronder geef ik een uitgebreidere beschrijving van deze opleidingen.

De bachelor ICT & Artificial Intelligence is een brede opleiding waarin studenten zich verdiepen in de principes van AI, *machine learning*, *data science* en statistiek. De opleiding is gericht op het ontwikkelen van een brede set van vaardigheden die nodig zijn om AI-technologieën efficiënt te gebruiken in de verschillende toepassingen, zoals robotica, beeldherkenning en *natural language processing*. Tijdens de opleiding volgen studenten vakken als algoritmieken, programmeren, databases, wiskunde, AI en statistiek. Daarnaast hebben studenten de mogelijkheid om deel te nemen aan projecten en stage te lopen bij bedrijven, zodat zij de geleerde theorie kunnen toepassen in de praktijk.

Hiernaast biedt Hogeschool Rotterdam een aantal opleidingen op het gebied van logistiek aan. In de eerste plaats noem ik de bachelor Logistics Engineering. Bij deze opleiding draait het om het beheersen en organiseren van logistieke ketens. Hierbij ligt de focus op hoe je naar logistieke processen moet kijken, hoe verbeterprocessen kunnen worden ontworpen en hoe deze kunnen worden uitgevoerd. Hiernaast richt de opleiding zich ook op de technische aspecten van de logistiek, in onder andere de vakken wiskunde, natuurkunde en transporttechniek. Hiernaast is er de bachelor Logistics Management. Deze opleiding is gericht op het ontwikkelen van experts in de logistieke sector. Tijdens deze opleiding verdiepen studenten zich in de principes van logistiek, *supply chain management* en bedrijfskunde. Ze volgen cursussen in diverse onderwerpen zoals logistieke planning, inkoop, opslag, transport en distributie, kwaliteitsmanagement, bedrijfseconomie en bedrijfsprocessen. Deze opleiding is ontworpen om studenten te voorzien van de vaardigheden om efficiënte en innovatieve oplossingen te ontwikkelen voor logistieke uitdagingen. De opleiding legt de nadruk op het toepassen van technologieën zoals AI, IoT en big data in logistieke processen. Studenten leren om te gaan met complexe logistieke uitdagingen en deze op te lossen.

Naast deze bachelors is er de master International Supply Chain Management. Dit is een brede masteropleiding waarbij aandacht wordt besteed aan alle gebieden, van supply chain management in een internationale context waaronder *sourcing*, planning, transport, distributie, opslag, voorraadbeheer, klantenservice en strategisch leiderschap.

Het programma is ontworpen om te voorzien in de kennis en vaardigheden die nodig zijn om de transformatie te maken naar de rol van *supply chain manager*.

4.3 Verbinding met onderwijs en onderzoek

Mijn lectoraat is met name gericht op de technische logistieke opleidingen van Hogeschool Rotterdam, zoals de bachelors Logistics Engineering en Logistics Management en de master International Supply Chain Management. Mijn Lectoraat zal zich echter niet beperken tot deze technische opleidingen, maar ook nauw samenwerken met de bachelor Werktuigbouwkunde en uiteraard de bachelor ICT & Artificial Intelligence.

Het doel van dit boekje is in de eerste plaats om docenten inzicht te geven in de kansen die AI biedt voor de logistiek en duidelijk te maken dat AI niet meer weg te denken is uit de huidige praktijk en in het bijzonder de toekomstige praktijk. Mijn visie is dat AI een belangrijk onderdeel moet uitmaken van het onderwijs, om daarmee onze studenten een T-shaped profiel mee te geven en hen daarmee waardevoller te maken voor de praktijk. Hiermee bedoel ik dat onze studenten niet alleen specialist zijn op het gebied van logistiek, maar zich ook in de breedte ontwikkelen.

Mijn lectoraat draagt bij aan het onderwijs middels praktijkgericht onderzoek. Het is hierbij cruciaal dat docenten betrokken zijn bij dit onderzoek, omdat zij de ontwikkelde kennis middels vernieuwing van het curriculum kunnen doorgeven aan de studenten, onze logistieke- en AI-experts van de toekomst. Met de inzichten vanuit het praktijkgericht onderzoek kunnen bovendien stakeholders worden geadviseerd over innovaties met AI, die bijdragen aan het duurzamer maken van hun logistieke processen.

Naast docenten moeten uiteraard ook studenten nadrukkelijk worden betrokken in het onderzoek. Het is immers belangrijk dat onze studenten ook beschikken over de vaardigheden om onderzoek uit te voeren. Het gaat hierbij naar mijn mening niet alleen om kennis van logistiek en AI, maar ook om kennis van onderzoeksmethoden die ingezet kunnen worden bij praktijkgericht bachelor- of masteronderzoek. Deze vaardigheden dragen bij aan een goede uitoefening van hun toekomstige rol als expert. Naast goede kennis van de logistieke processen en van AI moeten de studenten dus ook beschikken over een onderzoekende houding, de vaardigheid om relevante (wetenschappelijke) bronnen te raadplegen en te gebruiken in hun onderzoek en de vaardigheid om zelf een onderzoek op te zetten en uit te voeren.

Het is mijn ambitie als lector om samen met de opleidingen onderzoek uit te voeren. Hierbij vallen de onderzoeken die studenten uit gaan voeren (deels) onder de thema's die ik in hoofdstuk 3 heb beschreven. Hierbij gaat het dus om de thema's 'warehouse-

en hublocaties met AI', 'logistieke paden met AI en cyber-fysieke systemen', 'voorspellen van de transportvraag met AI', 'automatische detectie van de status van een warehouse met AI' en 'AI-gestuurd *predictive maintenance*'. Bij deze onderzoeken zullen studenten in verschillende fasen van hun opleiding worden betrokken. De mogelijkheden tot samenwerking met de verschillende opleidingen zijn hierbij legio. Zo wordt een nauwe samenwerking op alle projecten voorzien met de bachelor ICT & Artificial Intelligence. Voor de projecten gerelateerd aan het onderzoek gericht op 'warehouse- en hublocaties met AI' kan een duidelijke verbinding met de bachelor Logistics Management en de master International Supply Chain Management worden waargenomen, wat eveneens geldt voor de projecten die voortkomen uit het thema 'voorspellen van de transportvraag met AI'. Projecten die voortkomen uit het thema 'logistieke paden met AI en cyber-fysieke systemen' en 'automatische detectie van de status van een warehouse met AI' hebben een sterke verbinding met de opleiding Logistics Engineering. Tot slot is een duidelijke verbinding tussen projecten uit het thema 'AI-gestuurd *predictive maintenance*' en de opleiding Werktuigbouwkunde.

De voornoemde thema's kunnen als zeer omvangrijk worden gezien. Om deze reden is het noodzakelijk om samen met het onderwijs en de praktijk te onderzoeken hoe deze thema's nader geconcretiseerd kunnen worden. Ook verwacht ik dat het onderzoek binnen mijn lectoraat zich niet zal beperken tot deze thema's. Mijn visie is dat deze thema's concreter kunnen worden gemaakt door het opzetten van een DataLab. In de volgende paragraaf geef ik een beschrijving van dit concept.

4.4 DataLab als vehikel voor verbinding

Voor het kunnen realiseren van innovatief onderwijs op het gebied van AI en logistiek is een DataLab, of *learning community*, onmisbaar. Bovendien is een dergelijk platform in mijn optiek onmisbaar voor het goed verbinden van onderwijs met onderzoek. Deze plek moet zich ontwikkelen tot een plek die innovatie stimuleert op het gebied van data in zijn algemeenheid en in het bijzonder op AI, met als focus het efficiënter en duurzamer maken van de logistiek in de regio.

Het DataLab zal individuen en organisaties een fysieke en mentale ruimte bieden om te leren en ontwikkelen. Hiermee wordt de adaptatie van nieuwe technieken, onderzoeksvormen en analysevormen versneld. Kennisdeling staat hierbij centraal. Het DataLab fungeert als een verbinder tussen onderwijs, onderzoek, overheid en bedrijfsleven. Datavraagstukken en verduurzaming van de logistiek en andere maatschappelijke vraagstukken worden hiermee onderdeel van het onderwijs.

(Maatschappelijke) datavraagstukken waarbij gebruik kan worden gemaakt van AI, zijn veelal regionaal van karakter. Het DataLab zal zich als een spin in het web van regionale

datavraagstukken binnen de logistieke sector ontwikkelen en de samenwerking tussen overheden en private partijen stimuleren. Op deze manier krijgt het doel van het DataLab vorm en wordt er een bijdrage geleverd aan de publieke waarde.

Ik voorzie dat het DataLab niet alleen een ontmoetingsplaats van mensen wordt, maar ook een ontmoetingsplaats van relevante data. Waar data organisatieoverstijgend van karakter is, vervult het DataLab de rol van (data)vindplaats. Hiermee zal het lab bijdragen aan de 'databank' van de regio.

Het DataLab heeft drie doelstellingen. In de eerste plaats is het doel om state-of-the-art onderwijs mogelijk te maken. Dit ziet zowel op onderwijs voor studenten als onderwijs voor docent-onderzoekers en professionals uit het werkveld. State-of-the-art onderwijs kan worden bereikt door samen te werken aan innovatieve projecten, waarbij een synergie tussen onderwijs, onderzoek en praktijk centraal staat. Deze synergie waarborgt dat het onderwijs en het onderzoek actueel zijn en dus gerelateerd aan de laatste wetenschappelijke inzichten en relevante onderzoeksvragen voortkomend uit de praktijk.

In de tweede plaats heeft het lab tot doel om onderzoeksoutput van hoge kwaliteit te genereren. Door het uitvoeren van innovatieve projecten en het werken in co-creatie met professionals uit het bedrijfsleven en (lokale) overheden kunnen nieuwe inzichten worden verworven en toepassingen worden gecreëerd. Dit moet leiden tot een substantiële wetenschappelijke output, hetgeen onder andere tot uitdrukking komt in een aantal publicaties in wetenschappelijke tijdschriften en presentaties op conferenties.

In de derde plaats heeft het lab als doel om (extern) gefinancierde projecten te verwerven. Idealiter werken studenten, docent-onderzoekers en professionals in co-creatie, terwijl zij gefinancierd zijn vanuit bijvoorbeeld (lokale) overheden of bedrijfsleven of met wetenschappelijke subsidies.

Het lab zal worden gebouwd op drie pijlers. De eerste pijler is dat de projecten in het lab praktijkgericht en realistisch zijn. De tweede pijler is dat er wordt gewerkt in co-creatie. Projecten worden gecreëerd en geformuleerd samen met docent-onderzoekers, studenten en professionals uit de praktijk. Het van elkaar leren is het belangrijkste doel van co-creatie. De derde pijler is dat vanuit eerder verworven kennis nieuwe kennis wordt opgebouwd. Dit betekent dat idealiter wordt gewerkt aan langetermijnprojecten. Door het opzetten van een nauwkeurige documentatie van de verworven inzichten kan de kennis worden uitgebreid. Dit voorkomt de situatie dat het wiel steeds weer opnieuw wordt uitgevonden.

Onderwijs in het kader van het lab omvat het uitvoeren van praktijkgerichte projecten. Deze projecten worden gezamenlijk uitgevoerd door studenten, docent-onderzoekers, docenten en professionals uit de praktijk. Dit leidt ertoe dat studenten kunnen werken aan echte problemen en met echte datasets. Dit voorkomt het gebruik van synthetische datasets en het herhaaldelijk werken met dezelfde datasets.

Ik verwacht dat de focus van het DataLab op meerjarige projecten zal liggen. Dit is in overeenstemming met de voornoemde pijlers van het lab. Echter, om dit effectief te laten zijn, moet worden voldaan aan twee voorwaarden: herhaalbaarheid en overdraagbaarheid. Bij herhaalbaarheid en overdraagbaarheid gaat het erom dat onderzoek op een dusdanige manier wordt opgezet dat dit kan worden gerepliceerd. Door het goed opzetten en vastleggen van het onderzoek wordt het bovendien eenvoudiger om onderzoek over te dragen en op dit onderzoek voort te bouwen.

Het DataLab gaat niet het gehele land bedienen. We focussen met name op middelbaar en hoger beroepsonderwijs, het mkb in de logistieke sector en lokale overheden in de regio Zuid Holland. Daarom en om het succes van het DataLab te garanderen, zetten wij een samenwerking op met verschillende organisaties, zoals TU Delft, Erasmus Universiteit, gemeente Rotterdam, de Big Data Innovatiehub en verschillende stakeholders uit het mkb, onder andere via het platform MKB Rotterdam-Rijnmond.

Het gezamenlijk optrekken in de driehoek van praktijk, onderwijs en onderzoek op het gebied van AI voor een duurzamere logistiek leidt tot sterk verbeterd onderwijs en onderzoek en een waardevolle bijdrage aan de maatschappij. Ik wil in dit kader dan ook een lector zijn die nauw samenwerkt met zowel het onderwijs als de praktijk. Met name op het gebied van AI is dit erg belangrijk, omdat deze technologie in de toekomst niet meer weg te denken zal zijn.

Samenvatting

Nederland bekleedt internationaal een topositie in de afhandeling van fysieke goederenstromen. Om deze logistieke topositie te kunnen behouden, zal het Nederlandse bedrijfsleven echter moeten anticiperen op zowel voorspelbare als onvoorspelbare veranderingen.

Mondiale ontwikkelingen, zoals de opkomst van de *Emerging 7* of E7-landen, klimaatverandering en de toenemende nationalisering van natuurlijke hulpbronnen resulteren in kansen en uitdagingen voor de Nederlandse logistieke sector. De vanzelfsprekendheid dat Nederland de huidige goederenstromen zal kunnen en mogen verwerken, neemt af. En de kans op een negatieve financiële en sociaaleconomische impact neemt dus toe.

Tegelijkertijd ontstaan er nieuwe kansen binnen een nieuwe generatie logistiek. Deze nieuwe generatie kenmerkt zich door complexe netwerken en een verregaande digitalisering. Nederland heeft nu de mogelijkheid met zijn virtuele infrastructuur en dienstensector deze kansen te benutten en daarmee de logistieke concurrentiepositie te behouden of zelfs te versterken.

Behalve de internationale ontwikkelingen in de logistieke sector dwingen ook andere ontwikkelingen de Nederlandse logistieke bedrijven om te digitaliseren als ze financieel gezond willen blijven. Zo is er de toenemende internationale en nationale druk om de sector te verduurzamen, door bijvoorbeeld het energieverbruik en de CO₂-uitstoot substantieel terug te dringen. Daarvoor zal de sector een aantal maatregelen moeten nemen. Een belangrijke maatregel is het verbeteren van de efficiëntie om daarmee het aantal voertuigbewegingen te beperken en dus de uitstoot en het energieverbruik te verlagen.

Het is echter niet eenvoudig om deze maatregelen op een gedegen manier uit te werken. Digitalisering kent vele vormen en vereist een serieuze investering van de sector. Ook is nog niet duidelijk welke digitaliseringsingrepen effectief zullen zijn. Er zijn diverse vormen denkbaar. *Big data*, *cloud computing* en *artificial intelligence* (AI) kunnen allemaal bijdragen aan een wereldwijd efficiënter aansturen van goederen-, geld- en informatiestromen. De vraag waar de sector wil uitkomen, zal ook beantwoord moeten worden.

Mijn lectoraat Artificial Intelligence en Logistiek wil graag bijdragen aan het onderzoeken welke rol AI kan spelen in het efficiënter en duurzamer maken van logistieke processen. Door het uitvoeren van praktijkgericht onderzoek op het gebied van AI en logistiek zal

het lectoraat een bijdrage leveren aan de innovatie binnen de logistieke sector middels AI, waarbij AI transparant en verantwoordelijk moet zijn. Dit leidt tot de volgende opdracht voor mijn lectoraat:

Onderzoek op welke manier responsible artificial intelligence een waardevolle bijdrage kan leveren aan het verbeteren van de duurzaamheid van de logistiek door het efficiënter inrichten van de verschillende processen.

Om deze opdracht te kunnen vervullen, heb ik een aantal kansrijke gebieden geïdentificeerd voor het toepassen van AI, teneinde de logistiek duurzamer te maken. Hierbij heb ik een onderscheid gemaakt tussen processen op strategisch, tactisch en operationeel niveau. Binnen deze niveaus heb ik de volgende thema's belicht:

- optimalisatie van de locatie van warehouses en hubs met AI
- optimalisatie van het logistieke pad met AI en cyber-fysieke systemen
- voorspellen van de transportvraag met AI
- *smart warehousing* door accuraat de status van het warehouse te bepalen met AI
- AI-gestuurd *predictive maintenance*

Wat opvalt is dat onderzoekers tot nu toe AI slechts mondjesmaat hebben toegepast in hun onderzoek binnen deze thema's. In de regel gebruiken onderzoekers voor het optimaliseren van de processen in de logistiek vooral de traditionele methoden van operations research (OR), zoals linear programming en heuristieken.

Deze methoden vragen echter veel rekenkracht en zijn daardoor minder goed in staat om snel en (near)real-time resultaten te genereren. Ook kunnen deze modellen minder goed omgaan met complexere relaties tussen verschillende factoren.

Indien er wel sprake is van het toepassen van AI in onderzoek, dan worden meestal *artificial neural networks* gebruikt, omdat deze in het verleden vrij succesvol zijn gebleken. Mijn lectoraat gaat zich in dit kader vooral richten op het inzetten van methoden met *deep learning*, zoals geavanceerdere vormen van *artificial neural networks*, *ensemble learning* en *reinforcement learning* binnen de voornoemde thema's. Ik voorzie dat deze methoden in termen van benodigde rekenkracht en accuraatheid belangrijke voordelen bieden ten opzichte van de op OR gebaseerde methoden. Bovendien stellen de methoden die ik wil inzetten, de onderzoeker in staat om duurzaamheid uitdrukkelijk als factor mee te nemen.

Het onderzoek van mijn lectoraat is, behalve voor het positieve effect op duurzaamheid en de efficiëntie van de logistiek, van groot belang voor de ontwikkeling van de logistiek-

en AI-expert van de toekomst. Door het verbinden van onderzoek met onderwijs middels het uitvoeren van praktijkgericht onderzoek draagt mijn lectoraat bij aan het ontwikkelen van T-shaped professionals in de logistiek, dus professionals die zowel generalist als specialist zijn. Deze verbinding geef ik vorm in een nauwe samenwerking met de verschillende opleidingen binnen Hogeschool Rotterdam en met professionals uit de logistieke praktijk.

Ik voorzie dat deze nauwe samenwerking versterkt kan worden door het ontwikkelen van een DataLab, een plek waarbinnen lectoren, docent-onderzoekers, studenten en professionals uit de logistieke praktijk samen kunnen werken en leren aan AI-gerelateerde oplossingen binnen de voornoemde thema's van mijn lectoraat.

Summary

The Netherlands is one of the leading countries in terms of handling the physical flows of goods. However, to maintain its top logistics ranking, Dutch businesses will have to anticipate both predictable and unpredictable changes.

Global developments such as the emergence of Emerging 7 countries, climate change and the increasing nationalisation of natural resources result in opportunities and challenges for the Dutch logistics sector. However, it is becoming less obvious that the Netherlands will be able and allowed to handle current flows of goods. And the likelihood of a negative financial and socio-economic impact is therefore increasing.

At the same time, new opportunities are emerging through a new generation of logistics. This new generation is characterized by complex networks and extensive digitization. Through its virtual infrastructure and service sector, the Netherlands now has the chance to exploit these opportunities and thus maintain or even strengthen its logistics competitive edge.

Besides the fact that international developments in the logistics sector are forcing Dutch logistics companies to digitize if they want to remain financially healthy, there are other developments pushing them to do so. For instance, there is increasing international and national pressure to make the sector more sustainable by substantially reducing energy consumption and CO₂ emissions. This will require the sector to make a number of adjustments. One key measure is to increase efficiency in order to reduce the number of vehicle movements, thereby reducing emissions and energy consumption.

Although it seems easy on paper, it can be hard to work this out in a thorough way. Digitization takes many forms and also requires serious investments from the sector. It is also not yet clear which digitization interventions will be effective. Several forms are conceivable. Big Data, cloud computing and Artificial intelligence (AI) can all contribute to more efficient management of goods, money and information flows worldwide. The question of where the sector wants to end up will also have to be answered.

My Professorship of Artificial Intelligence and Logistics is keen to contribute to exploring the role AI can play in making logistics processes more efficient and sustainable. By carrying out practice-oriented research in the field of AI and logistics, a contribution will be made to innovating the logistics sector through AI. More specifically, this will take into account that AI must be transparent and accountable. This leads to the following assignment for my Professorship:

Investigate how Responsible Artificial Intelligence can make a valuable contribution to improving the sustainability of logistics by making the various processes more efficient.

To fulfil this assignment, I have identified a number of promising areas for applying AI to make logistics more sustainable and efficient. In doing so, I have distinguished between processes at strategic, tactical and operational levels. Within these levels, I have highlighted the following themes:

- Optimization of the location of warehouses and hubs
- Optimization of the logistics path with AI and cyber-physical systems
- Predicting transport demand
- Smart warehousing by accurately determining warehouse state with AI
- AI-driven predictive maintenance

It is striking that in the research conducted within these themes, AI is only applied sparsely. As a rule, traditional Operations Research methods, such as linear programming and heuristics, are mainly used to optimize processes in logistics. However, these methods require a lot of computing power and are therefore less useful to generate fast and (near) real-time results. Also, these models are less able to handle more complex relationships between different influencing factors.

If researchers do involve the use of AI, Artificial Neural Networks are generally used, as they have proven quite successful in the past. In this context, my professorship is going to focus on the use of deep learning methods, such as more advanced forms of Artificial Neural Networks, ensemble learning methods and reinforcement learning within the aforementioned themes. I foresee these methods offering significant advantages over current OR-based methods in terms of computing power required and accuracy. Moreover, these methods enable the explicit inclusion of sustainability as a factor.

In addition to the positive impact on sustainability and logistics efficiency, this research is very important for the development of the logistics and AI expert of the future. By connecting research and education through practice-oriented research, my professorship contributes to the development of T-shaped professionals in logistics. In doing so, I aim to establish a close cooperation with the various programmes within the Rotterdam University of Applied Sciences as well as professionals from the logistics practice.

I expect that this close cooperation can be strengthened by developing a DataLab, a place where professors, lecturer-researchers, students and professionals from the logistics practice can work and learn together on AI-related solutions within the aforementioned themes of my professorship.

Literatuur

- Adhikari, P., Rao, H. G., & Buderath, M. (2018). Machine learning based data driven diagnostics & prognostics framework for aircraft predictive maintenance. In *10th international symposium on NDT in aerospace 2018. Dresden, Germany*. (pp. 113-127). Deutsche Gesellschaft Für Zerstörungsfreie Prüfung.
- Ahmad, A. S., Hassan, M. Y., Abdullah, M. P., Rahman, H. A., Hussin, F., Abdullah, H., & Saidur, R. (2014). A review on applications of ANN and SVM for building electrical energy consumption forecasting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 102-109.
- Amiri, A. (2006). Designing a distribution network in a supply chain system: Formulation and efficient solution procedure. *European Journal of Operational Research*, 171(2), 567-576.
- Arntzen, B. C., Brown, G. G., Harrison, T. P., & Trafton, L. L. (1995). Global supply chain management at digital equipment corporation. *Interfaces*, 25(1), 69-93.
- Baesso, R. M., Oliveira, P. A., Morais, G. C., Alvarenga, A. V., & CostaFelix, R. P. (2018). Using ultrasonic velocity for monitoring and analysing biodiesel production. *Fuel*, 226, 389-399.
- Cachada, A., Barbosa, J., Leitão, P., Gcraldcs, C. A., Deusdado, L., Costa, J., Teixeira, C., Teixeira, J., Moreira, A., Miguel, P., & Romero, L. (2018). Maintenance 4.0: Intelligent and predictive maintenance system architecture. In *2018 IEEE 23rd international conference on emerging technologies and factory automation (ETFA)* (vol. 1, pp. 139-146). Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Chen, C., Zhang, L., Wang, L., Liu, Q., Shan, T. & Wei, W. (2019). Monitoring of contact state of GIS switch based on infrared sensing technology. *The Journal of Engineering*, 2019(16), 2529-2533.
- Chen, G., Wang, P., Feng, B., Li, Y., & Liu, D. (2020). The framework design of smart factory in discrete manufacturing industry based on cyber-physical system. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 33(1), 79-101.
- Cho, K., Van Merriënboer, B., Gulcehre, C., Bahdanau, D., Bougares, F., Schwenk, H., & Bengio, Y. (2014). Learning phrase representations using RNN encoder-decoder for statistical machine translation. *arXiv preprint arXiv:1406.1078*.
- Chukwuekwe, D. O., Glesnes, T., & Schjøberg, P. (2016). Condition monitoring for predictive maintenance – Towards systems prognosis within the industrial internet of things. In J. Sinha, A. Yunusa-Kaltungo, W. Hahn (Eds.), *Proceedings of 1st International conference on maintenance engineering: InCoME-I*. (Vol. 1). The University of Manchester Manchester.
- Crespo Márquez, A., de la Fuente Carmona, A. & Antomarioni, S. (2019). A process to implement an artificial neural network and association rules techniques to improve asset performance and energy efficiency. *Energies*, 12(18), 3454.

- Damasio, A. R. (1996). The somatic marker hypothesis and the possible functions of the prefrontal cortex. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 351(1346), 1413-1420.
- De Vita, F., Bruneo, D. & Das, S. K. (2020). A novel data collection framework for telemetry and anomaly detection in industrial IoT systems. In *2020 IEEE/ACM fifth international conference on Internet-of-Things design and implementation (IoTDi 2020)* (pp. 245-251). Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Diete, A., Szttyler, T., Weiland, L., & Stuckenschmidt, H. (2017). Recognizing grabbing actions from inertial and video sensor data in a warehouse scenario. *Procedia Computer Science*, 110, 16-23.
- Ding, K., Jiang, P., & Su, S. (2018). RFID-enabled social manufacturing system for inter-enterprise monitoring and dispatching of integrated production and transportation tasks. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 49, 120-133.
- Dong, X., Zhang, H., Xu, M., & Shen, F. (2021). Hybrid genetic algorithm with variable neighborhood search for multi-scale multiple bottleneck traveling salesmen problem. *Future Generation Computer Systems*, 114, 229-242.
- Egger, J., Michlmayr, S., Piepgras, R., Espina-Hernández, J., & Zagar, B. (2018). A Faraday effect magnetic stripe scanner. *Journal of physics: Conference series*, 1065(3), 032013.
- Ekmekçioğlu, M., Kaya, T., & Kahraman, C. (2010). Fuzzy multicriteria disposal method and site selection for municipal solid waste. *Waste management*, 30(8-9), 1729-1736.
- Fraix-Burnet, D., Thuillard, M., & Chattopadhyay, A. K. (2015). Multivariate approaches to classification in extragalactic astronomy. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 2(3).
- Gosasang, V., Chandraprakaikul, W., & Kiattisin, S. (2011). A comparison of traditional and neural networks forecasting techniques for container throughput at Bangkok Port. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, 27(3), 463-482.
- Han, S., Park, Y., & Kim, H. (2018). Extending bluetooth LE protocol for mutual discovery in massive and dynamic encounters. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 18(10), 2344-2357.
- Hashemian, H. M. (2010). State-of-the-art predictive maintenance techniques. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 60(1), 226-236.
- Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J. H., & Friedman, J. H. (2009). *The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction* (2nd edition). Springer.
- Hegedüs, C., Varga, P. & Moldován, I. (2018). The MANTIS architecture for proactive maintenance. In *2018 5th international conference on control, decision and information technologies (CoDIT)* (pp. 719-724). Institute of Electrical and Electronics Engineers.

- Hidaka, K., & Okano, H. (1997). Simulation-based approach to the warehouse location problem for a large-scale real instance. In S. Andradóttir, K. J. Healy, D. H. Withers, & B. L. Nelson (Eds.), *Proceedings of the 29th conference on winter simulation, WSC 1997* (pp. 1214-1221). IEEE Computer Society.
- Jiang, J., Trundle, P., & Ren, J. (2010). Medical image analysis with artificial neural networks. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 34(8), 617-631.
- Karungaru, S., Dongyang, L., & Terada, K. (2021). Vehicle detection and type classification based on CNN-SVM. *International Journal of Machine Learning and Computing*, 11(4), 304-310.
- Kratika, J., Tomic, D., & Filipovic, V. (1998). Solving the uncapacitated warehouse location problem by SGA with add-heuristic. In *XV ECPD international conference on material handling and warehousing*. (dl. 167).
- Kuo, M.-S. (2011). Optimal location selection for an international distribution center by using a new hybrid method. *Expert Systems with Applications*, 38(6), 7208-7221.
- Lam, W. H., Ng, P. L., Seabrooke, W., & Hui, E. C. (2004). Forecasts and reliability analysis of port cargo throughput in Hong Kong. *Journal of Urban Planning and Development*, 130(3), 133-144.
- LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436-444.
- Lee, C. K., Lv, Y., Ng, K., Ho, W., & Choy, K. L. (2018). Design and application of internet of things-based warehouse management system for smart logistics. *International Journal of Production Research*, 56(8), 2753-2768.
- Li, T., Huang, B., Li, C., & Huang, M. (2019). Application of convolution neural network object detection algorithm in logistics warehouse. *The Journal of Engineering*, 2019(23), 9053-9058.
- Li, Z., Wang, Y., & Wang, K.-S. (2017). Intelligent predictive maintenance for fault diagnosis and prognosis in machine centers: Industry 4.0 scenario. *Advances in Manufacturing*, 5(4), 377-387.
- Liu, Y., Peng, Y., Wang, B., Yao, S., & Liu, Z. (2017). Review on cyber-physical systems. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 4(1), 27-40.
- Liu, Y., Zou, B., Ni, A., Gao, L., & Zhang, C. (2021). Calibrating microscopic traffic simulators using machine learning and particle swarm optimization. *Transportation Letters: The International Journal of Transportation Research*, 13(4), 295-307.
- Liu, Z., Ji, L., Ye, Y., & Geng, Z. (2007). Combined forecast method of port container throughput based on RBF neural network. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 6, 739-744.
- Liukkonen, M., & Tsai, T.-N. (2016). Toward decentralized intelligence in manufacturing: recent trends in automatic identification of things. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(9), 2509-2531.
- McCarthy, J. (2004). *What is artificial intelligence?* Geraadpleegd op 2 February 2022 van <http://www-formal.stanford.edu/jmc/whatisai>

- Milenković, M., Milosavljevic, N., Bojović, N., & Val, S. (2021). Container flow forecasting through neural networks based on metaheuristics. *Operational Research*, 21(2), 965–997.
- Niu, M., Hu, Y., Sun, S., & Liu, Y. (2018). A novel hybrid decomposition-ensemble model based on VMD and HGWO for container throughput forecasting. *Applied Mathematical Modelling*, 57, 163–178.
- Ou, C.-W., & Chou, S.-Y. (2009). International distribution center selection from a foreign market perspective using a weighted fuzzy factor rating system. *Expert Systems with Applications*, 36(2), 1773–1782.
- Pickering, J. (2017, 19 september). *Take a look inside Alibaba's smart warehouse where robots do 70% of the work* [Video]. Geraadpleegd op ... van: <https://www.businessinsider.com/inside-alibaba-smart-warehouse-robots-70-per-cent-worktechnologylogistics-2017-9>
- Rivas, A., Fraile, J. M., Chamoso, P., González-Briones, A., Sittón, I., & Corchado, J. M. (2019). A predictive maintenance model using recurrent neural networks. In F. Martínez Álvarez, A. Troncoso Lora, J. Sáez Muñoz, H. Quintián, & E. Corchado (red.), *of 14th international conference on soft computing models in industrial and environmental applications: Proceedings. AISC*, vol. 950. (pp. 261–270). Springer.
- Ross, A. D., Twede, D., Clarke, R. H., & Ryan, M. (2009). A framework for developing implementation strategies for a radio frequency identification (RFID) system in a distribution center environment. *Journal of Business Logistics*, 30(1), 157–183.
- Schmidt, B., & Wang, L. (2018). Predictive maintenance of machine tool linear axes: A case from manufacturing industry. In D. Šormaz, G. Süer, & F. Chen (red.), *28th international conference on flexible automation and intelligent manufacturing (FAIM2018), June 11–14, 2018, Columbus, OH, USA: Global integration of intelligent manufacturing and smart industry for good of humanity*. Procedia Manufacturing, vol. 17,(pp. 118–125). Elsevier.
- Świechowski, M., Park, H., Mańdziuk, J., & Kim, K.-J. (2015). Recent advances in general game playing. *The Scientific World Journal*, 2015(2), 986262.
- Tang, S., Zhao, H., Wang, Z., Zhu, Y., Hou, D., & Wang, H. (2021). Analysis of the material distribution system of wise information technology of 120 under deep learning. *The Journal of Supercomputing*, 77(9), 9988–10002.
- Tu, J. V. (1996). Advantages and disadvantages of using artificial neural networks versus logistic regression for predicting medical outcomes. *Journal of Clinical Epidemiology*, 49(11), 1225–1231.
- Wang, Q., Alyahya, S., Bennett, N., & Dhakal, H. (2015). An RFID-enabled automated warehousing system. *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, 3(4), 287–293.

- Wei, C. & Yang, Y. (1999). A study on transit containers forecast in Kaohsiung Port: applying artificial neural networks to evaluating input variables. *Journal of the Chinese Institute Transportation*, 11(3), 1-20.
- Wouda, H. E., van Beek, P., van der Vorst, J. G., & Tacke, H. (2002). An application of mixed-integer linear programming models on the redesign of the supply network of Nutricia Dairy & Drinks Group in Hungary. *OR Spektrum*, 24(4), 449-465.
- Wu, D. & Pan, X. (2010). Container volume forecasting of Jiujiang Port based on SVM and game theory. In *2010 international conference on intelligent computation technology and automation (ICICTA 2010)* (vol. 1, pp. 1035-1038). Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Xie, G., Wang, S., Zhao, Y. & Lai, K. K. (2013). Hybrid approaches based on LSSVR model for container throughput forecasting: a comparative study. *Applied Soft Computing*, 13(5), 2232-2241.
- Xu, Y., Sun, Y., Liu, X., & Zheng, Y. (2019). A digital-twin-assisted fault diagnosis using deep transfer learning. *IEEE Access*, 7, 19990-19999.
- Yuan, Y., Ma, G., Cheng, C., Zhou, B., Zhao, H., Zhang, H.-T., & Ding, H. (2018). Artificial intelligent diagnosis and monitoring in manufacturing. *arXiv preprint arXiv:1901.02057*.
- Zhang, C., Huang, L. & Zhao, Z. (2013). Research on combination forecast of port cargo throughput based on time series and causality analysis. *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)*, 6(1), 124-134.
- Zhao, K., Zhu, M., Xiao, B., Yang, X., Gong, C., & Wu, J. (2020). Joint RFID and UWB technologies in intelligent warehousing management system. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(12), 11640-11655.
- Zhao, T., Guan, Y., Liu, T., & Wang, Q. (2007). Recent advances on NLP research in Harbin Institute of Technology. *Frontiers of Computer Science in China*, 1(4), 413-428.
- Zhou, C. & Tham, C.-K. (2018). GraphEL: A graph-based ensemble learning method for distributed diagnostics and prognostics in the industrial internet of things. In *2018 IEEE 24th international conference on parallel and distributed systems (ICPADS 2018)* (pp. 903-909). Institute of Electrical and Electronics Engineers.

Dankwoord

Beste lezer, in mijn openbare les heb ik u meegenomen in de wereld van AI en duurzame logistiek. AI is voor velen nog steeds een abstract begrip. Mijn grootste uitdaging lag dan ook in het voor een breed publiek inzichtelijker maken van wat AI nu eigenlijk is. Het feit dat AI een zeer technische discipline is, maakte dit tot een grote uitdaging.

Ik heb geprobeerd om uit te leggen wat AI is, wat mijn visie is ten aanzien van het inzetten van AI om de logistiek duurzamer te maken en hoe mijn onderzoeksagenda eruitziet. Bovendien heb ik besproken hoe ik denk dat wij onderzoek en onderwijs goed kunnen verbinden teneinde onze studenten op te leiden tot toekomstige experts op het gebied van logistiek en AI en de logistieke praktijk van dienst te kunnen zijn.

Ik heb het schrijven van deze openbare les als een intensief proces ervaren. Gelukkig hebben veel mensen een bijdrage geleverd. In het bijzonder wil ik Liek Voorbij bedanken. Zij heeft mij enorm geholpen bij het concreter maken van mijn visie en de vertaling daarvan in een leesbaar en coherent verhaal. Zij heeft mij hiernaast met name zeer geholpen met het toegankelijker maken van mijn verhaal door kritisch mee te lezen en de juiste vragen te stellen.

Ook wil ik mijn dank uitspreken aan Eliza van 't Zelfde, Joyce Weijers, Elin Koppelaar, Maartje de Klerk, Sandra Bloemrijk en Frank van der Zwan die mij hebben begeleid in het proces naar een formele openbare les op papier.

Ik bedank mijn collega-lectoren, die voor mij als een belangrijke inspiratiebron gelden. Mijn thuisbasis van CoE HRTech en voorheen Kenniscentrum Duurzame Havenstad is voor mij een belangrijke voedingsbodem voor nieuwe ideeën maar zeker ook voor collegialiteit en gezelligheid.

Docenten, studenten en mijn netwerk vormen een belangrijk onderdeel van mijn openbare les. In dit kader wil ik dan ook de verschillende docenten bedanken die mij de kans hebben gegeven om mooie gastcolleges te geven het afgelopen jaar. Deze openbare les is wat mij betreft dan ook echt een verhaal van ons allemaal.

Ook wil ik graag het College van Bestuur bedanken voor het in mij gestelde vertrouwen en het feit dat zij mij in staat hebben gesteld dit onderzoek op te zetten en de komende jaren uit te voeren. Ik ben erg trots om deel uit te mogen maken van deze mooie hogeschool.

Tot slot wil ik mijn vrouw Patricia en mijn dochter Fabienne bedanken voor het geduld dat zij met mij hadden als ik weer eens uren achter elkaar achter mijn laptop aan dit verhaal zat te schrijven.

Over de lector

Raymond G. Hoogendoorn is geboren in 1969 in Rotterdam. Na enkele carrièrewisselingen is hij in 2006 begonnen met een studie psychologie aan de Open Universiteit Nederland. Binnen drie jaar behaalde hij zijn bachelor- en zijn mastergraad cum laude. In de context van zijn masterthesis heeft hij onderzoek gedaan naar de invloed van emoties op rijgedrag in de context van de *somatic marker hypothesis*.

Vanaf 2009 is Raymond verbonden aan de afdeling Transport en Planning van de Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen van de Technische Universiteit Delft. Hij voerde daar zijn PhD-onderzoek uit op het gebied van de empirie en wiskundige modellering van longitudinaal rijgedrag onder exceptionele omstandigheden. Zijn onderzoek maakte deel uit van het onderzoeksprogramma Traffic and Travel Behaviour in case of Exceptional Events, gesponsord door NWO-MaGW.

Gedurende zijn promotieonderzoek is Raymond betrokken geweest bij verschillende commerciële projecten. Bijvoorbeeld heeft hij gedragsonderzoek gedaan naar de invloed van dynamische maximumsnelheden op perceptie, mentale taakbelasting en opvolging. Verder heeft hij onderzoek met een rijsimulator uitgevoerd naar de effectiviteit van verkeersmanagementmaatregelen bij een tunnel bij de stad Utrecht.

Verder heeft hij tijdens zijn promotieonderzoek verschillende onderwijsactiviteiten uitgevoerd. Zo heeft hij een TRAIL-cursus georganiseerd over theorieën en methoden in de transport, heeft hij verschillende masterstudenten begeleid bij hun scriptie en heeft hij colleges gegeven over modellen en statistiek inzake *car-following*.

Na zijn promoveren is Raymond benoemd tot assistant professor aan de Technische Universiteit Delft op het gebied van intelligente transportsystemen. In deze rol heeft hij vele PhD-studenten en masterstudenten begeleid en meer dan 50 onderzoeken gepubliceerd in peer-reviewed tijdschriften en hoofdstukken in boeken.

Na zijn tijd aan de Technische Universiteit Delft heeft Raymond verschillende rollen vervuld, zoals Lead Data Scientist bij CGI, hoofd Data Science bij Transavia en Associate Director Consumer Insights bij Lowell Financial Ltd. De afgelopen jaren was Raymond verder werkzaam als hoofddocent Data Science aan de Haagse Hogeschool.

Per 1 januari 2022 is Raymond benoemd tot lector Artificial Intelligence en Logistiek aan Hogeschool Rotterdam. Binnen deze rol doet hij onderzoek naar de toegevoegde waarde van *artificial intelligence* in het verduurzamen van logistieke processen.

Eerdere uitgaven

Hogeschool Rotterdam Uitgeverij

Versterken van het curriculaire denken en werken binnen Hogeschool Rotterdam
De rol van de onderwijs- en onderzoeksinstituten
Dominique Sluijsmans



Versterken van het curriculaire denken en werken binnen Hogeschool Rotterdam

Auteur Dominique Sluijsmans

ISBN 9789493012417

Verschijningsdatum januari 2023

Aantal pagina's 94



In verband met taal

Auteur Jacqueline van Kruiningen

ISBN 9789493012400

Verschijningsdatum januari 2023

Aantal pagina's 136



Zelfregulerend leren gaat niet vanzelf

Auteur Patrick Sins

ISBN 9789493012424

Verschijningsdatum januari 2023

Aantal pagina's 124



Ontwerpen en produceren voor waardebehoud in een circulaire economie

Auteur Marcel den Hollander

ISBN 9789493012363

Verschijningsdatum januari 2023

Aantal pagina's 89



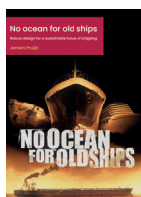
Energietransitie en circulariteit: onlosmakelijk met elkaar verbonden

Auteur Dr. ir. Gijsbert Korevaar

ISBN 9789493012356

Verschijningsdatum januari 2023

Aantal pagina's 89



No ocean for old ships Robust design for a sustainable future of shipping

Auteur Jeroen Pruijn

ISBN 9789493012387

Verschijningsdatum januari 2023

Aantal pagina's 51



Implementatie zorgtechnologie Samen zorgen dat het kan!

Auteur Helma Kaptein

ISBN 9789493012349

Verschijningsdatum november 2022

Aantal pagina's 96



"Ik heb geen probleem"

Auteur Arie de Wild

ISBN 9789493012370

Verschijningsdatum oktober 2022

Aantal pagina's 80



Cybersocial Design

Auteur Anja Overdiek

ISBN 9789493012288

Verschijningsdatum juli 2022

Aantal pagina's 72



Civic Prototyping

Auteur Tomasz Jaśkiewicz

ISBN 9789493012325

Verschijningsdatum juli 2022

Aantal pagina's 80



Topical Advertising: The Role of Timing and Creativity in Understanding Its Effectiveness

Auteur Komala Mazerant-Dubois

ISBN 9789493012257

Verschijningsdatum mei 2022

Aantal pagina's 176



De professionele identiteit van de sociaal werker

Auteur Leonie le Sage

ISBN 9789493012318

Verschijningsdatum januari 2022

Aantal pagina's 104

ISBN 9789493012332

Artificial Intelligence voor Duurzamere en Efficiëntere Logistiek



Nederland bekleedt internationaal een toppositie in de afhandeling van fysieke goederenstromen. Om deze logistieke toppositie te kunnen behouden, zal het Nederlandse bedrijfsleven echter moeten anticiperen op zowel voorspelbare als minder goed voorspelbare veranderingen. De vanzelfsprekendheid dat Nederland de huidige goederenstromen zal kunnen en mogen verwerken, neemt af. Tegelijkertijd ontstaan er nieuwe kansen binnen een nieuwe generatie logistiek, die zich kenmerkt door complexe netwerken en een verregaande digitalisering.

Behalve internationale ontwikkelingen in de logistieke sector dwingen ook andere ontwikkelingen de Nederlandse logistieke bedrijven om te digitaliseren als ze hun toppositie willen blijven behouden. Zo is er de toenemende internationale en nationale druk om de sector te verduurzamen, door bijvoorbeeld het energieverbruik en de CO₂-uitstoot substantieel terug te dringen. Daarvoor zal de sector maatregelen moeten nemen, zoals het verbeteren van de efficiëntie door bijvoorbeeld het aantal voertuigbewegingen terug te dringen.

Het is echter niet eenvoudig om deze maatregelen op een gedegen manier uit te werken. Digitalisering kent vele vormen en kan een serieuze investering vergen. Ook is het nog niet goed duidelijk welke digitaliseringsingrepen effectief zullen zijn. Met name *Artificial Intelligence* kan worden aangenomen substantieel te kunnen bijdragen aan een wereldwijd efficiënter aansturen van goederenstromen.

In mijn openbare les neem ik u mee in de verschillende manieren waarop *Artificial Intelligence* kan bijdragen aan het efficiënter maken van de verschillende logistieke processen hetgeen leidt tot verduurzaming van de sector. In dit kader presenteer in deze openbare les dan ook mijn onderzoeksagenda voor de komende jaren.

Raymond Hoogendoorn is lector Artificial Intelligence voor de Logistiek bij Centre of Expertise HRTech van Hogeschool Rotterdam. Hij richt zich op het ontwikkelen en implementeren van *Artificial Intelligence* methoden en technieken teneinde de strategische, tactische en operationele processen in de logistiek efficiënter en duurzamer te maken.