

University of Groningen

Order fulfillment: warehouse and inventory models

Dijkstra, Arjan Stijn

IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

Document Version

Publisher's PDF, also known as Version of record

Publication date:

2019

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

Citation for published version (APA):

Dijkstra, A. S. (2019). Order fulfillment: warehouse and inventory models. [Groningen]: University of Groningen, SOM research school.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

Samenvatting en conclusies

Steeds vaker worden producten online gekocht en naar verwachting zal het doen van online aankopen de komende jaren verder toenemen. Orderverwerking is een belangrijk en kostbaar onderdeel van het logistieke proces van bedrijven die hun goederen online verkopen, de online retailers. Het stroomlijnen van het orderverwerkingsproces is daarom voor veel online retailers een belangrijk aandachtspunt.

In dit proefschrift hebben we gekeken naar dit orderverwerkingsproces, zowel vanuit het perspectief van magazijnmanagement als vanuit het perspectief van voorraadbeheer. Hierna wordt eerst de samenvatting van de bijdrage die dit proefschrift levert vanuit het perspectief van magazijnmanagement gegeven, waarna de samenvatting van de bijdrage die dit proefschrift levert vanuit het perspectief van voorraadbeheer aan bod komt. Ten slotte volgt de discussie en suggesties voor verder onderzoek.

Samenvatting bijdrage magazijnmanagement

De efficiëntie van het orderverwerkingsproces van online retailers wordt met name bepaald door het orderverzamelingsproces. Bij het verzamelen van orders worden producten uit voorraadlocaties in een magazijn gehaald. Verschillende aspecten beïnvloeden de prestatie van het orderverzamelingsproces, dat wordt gemeten als de gemiddelde verzameltijd per order. Deze aspecten zijn onder andere de routebepaling voor orderverzamelaars en de

voorraadlocaties voor producten.

De routes van orderverzamelaars spelen een belangrijke rol in veel optimalisatievraagstukken rond het orderverzamelingsproces, aangezien de lengte van deze routes een groot aandeel heeft in de tijd die het kost om een order te verzamelen. Verschillende heuristische routeringsmethodes bestaan om goede routes voor orderverzamelaars te bepalen, terwijl optimale routes kunnen worden gevonden door middel van dynamisch programmeren. Gegeven een routeringsmethode voor orderverzamelaars, worden routes bepaald door de locatie van de producten die moeten worden verzameld. Het ligt voor de hand om de voorraadlocaties van producten die vaak moeten worden verzameld dichtbij elkaar te plaatsen, om zo gemiddeld kortere routes voor orderverzamelaars te verkrijgen. In het voorraadlocatietoewijzingsprobleem wordt gezocht naar een toewijzing van producten aan voorraadlocaties, op zodanige wijze dat de gemiddelde afstand van routes resulterend uit deze toewijzing zo kort mogelijk is. De prestatie van een gegeven toewijzing hangt sterk af van de gebruikte routeringsmethode.

In Hoofdstuk 2 hebben we gekeken naar het voorraadlocatietoewijzingsprobleem in een magazijn dat bestaat uit een enkel blok: een aantal gangen met opslaglocaties verbonden door twee dwarsgangen. Formules voor de gemiddelde routelengte voor orderverzamelaars zijn bepaald voor elke mogelijke toewijzing van producten aan voorraadlocaties voor verschillende routeringsmethodes. Deze formules zijn gebruikt om een aantal eigenschappen van optimale oplossingen voor het voorraadlocatietoewijzingsprobleem te bewijzen. De eigenschappen en de formules voor de gemiddelde routelengte zijn de basis voor een dynamisch programmeringsalgoritme dat de optimale voorraadlocatietoewijzing bepaalt voor sommige routeringsmethodes, terwijl het zeer goede oplossingen vindt voor andere routeringsmethodes. In numerieke experimenten vinden we voorraadlocatietoewijzingen met patronen die verschillen van eerder beschreven patronen in de wetenschappelijke literatuur, wat de toegevoegde waarde van onze construerende aanpak onderschrijft.

In Hoofdstuk 3 hebben we een methode beschreven waarmee de verwachte lengte van de optimale orderverzamelingsroute kan worden bepaald. Het klassieke dynamisch programmeringsalgoritme van Ratliff & Rosenthal

(1983) is aangepast, waardoor elke gang correspondeert met een enkel stadium van het algoritme in plaats van de oorspronkelijke twee. Gebaseerd op het algoritme hebben we laten zien dat de totale lengte van de optimale orderverzamelingsroute kan worden geschreven als de som van specifieke lengtes per gang. Op basis van deze decompositie hebben we een stochastisch dynamisch programmeringsalgoritme geformuleerd dat de verwachting van deze lengtes per gang bepaalt en daarmee de totale verwachte lengte van de orderverzamelingsroute. Daarnaast hebben we laten zien dat de toestandsruimte van het stochastisch dynamisch programmeringsprobleem begrensd is, waardoor het algoritme in polynomiale tijd de verwachte lengte van de optimale orderverzamelingsroute kan bepalen. In numerieke experimenten hebben we laten zien dat het algoritme de verwachte lengte van de optimale orderverzamelingsroute kan bepalen voor instanties van realistische grootte. Een eerdere benaderingsmethode (Hall, 1993) laat afwijkingen zien tot 19% van de daadwerkelijke verwachte lengte van de optimale orderverzamelingsroute die door ons bepaald is.

Samenvatting bijdrage voorraadbeheer

Het voorraadbeheer van online retailers houdt zich bezig met het balanceren van de beschikbaarheid van producten en de kosten van het hebben, verplaatsen en afboeken van voorraad. Het voorraadbeheer van online retailers wordt gecompliceerd door nee-verkopen in het geval van uitverkochte producten en door geretourneerde producten die voorraadniveaus verhogen. Het bundelen van voorraden – voorraadpooling – kan nuttig zijn om een hogere beschikbaarheid van producten te realiseren bij gelijkblijvende kosten. Er bestaan veel verschillende vormen van voorraadpooling, waaronder het houden van voorraad in een centraal magazijn en het verschepen van voorraden tussen verschillende voorraadpunten.

In Hoofdstuk 4 bestuderen we voorraadpooling in een bevoorradingsketen met een centraal magazijn en meerdere winkels, waarbij bestellingen periodiek kunnen worden gedaan en levertijden vast staan. Klantvraag vindt plaats in de winkels, waarbij vraag waaraan niet kan worden voldaan verloren gaat. De voorraden van de winkels worden door het cen-

trale magazijn aangevuld. De voorraad van het centrale magazijn wordt aangevuld door een externe leverancier, waarvan wordt aangenomen dat deze altijd over voldoende voorraad beschikt. De doelstelling is om bestelhoeveelheden te bepalen voor elke locatie in de bevoorradingsketen met minimale kosten op de lange termijn, waarbij de kosten bestaan uit een component voor het hebben van voorraden en een component voor het niet kunnen voldoen aan klantvraag. Een Markov-beslissingsproces is geformuleerd om optimale bestelhoeveelheden te bepalen voor alle locaties in de bevoorradingsketen. Daarnaast zijn echelon basisvoorraadniveau-bestelstrategieën voor de keten bestudeerd. Een Markov-keten is afgeleid om de kosten van zulke strategieën te bepalen en de beste basisvoorraadniveau-bestelstrategie voor verschillende instanties te bepalen. Het bepalen van de beste basisvoorraadniveau-bestelstrategie kost veel rekentijd. Daarnaast zijn de basisvoorraadniveaus gebaseerd op een equivalente situatie waarbij niet-voldane klantvraag kan worden nageleverd 4,5% tot 8,5% slechter dan de beste basisvoorraadniveaus. We hebben een benaderingsprocedure ontwikkeld voor de kosten van een gegeven basisvoorraadniveau-bestelstrategie. Op basis van deze benadering hebben we basisvoorraadniveaus bepaald. De resulterende strategieën weken over het algemeen minder dan 1% af van de beste basisvoorraadniveau-bestelstrategie in numerieke experimenten.

In Hoofdstuk 5 hebben we gekeken naar strategieën om *cross-channel* geretourneerde producten te verschepen. Het gaat hierbij om producten die online zijn gekocht, maar in een offline winkel zijn geretourneerd. We hebben gekeken naar een eindig periodiek verkoopseizoen. Aan het einde van elke periode in dit seizoen worden producten geretourneerd. Op dat moment kunnen deze producten worden verscheept naar de online winkel. Een Markov-beslissingsketen is geformuleerd om de optimale verschepingsbeslissing te bepalen. Deze beslissingsketen wordt te groot om numeriek op te lossen als het aantal winkels toeneemt. Daarom is een heuristisch ontwikkeld, op basis van verwachte kosten in de rest van het verkoopseizoen. Een geretourneerd product wordt verscheept naar de online winkel op het moment dat de afname in verwachte kosten opweegt tegen de kosten van het verschepen van het product. De kosten resulterend van de heuristisch weken in numerieke experimenten maximaal 1,59% af van de kosten beho-

rend bij een optimale strategie. Daarnaast is de heuristiek vergeleken met statische strategieën, waarin geretourneerde producten óf altijd worden verscheept naar de online winkel óf altijd worden gehouden in de winkel waar ze zijn geretourneerd. Deze statische strategieën bleken minder goed om te gaan met de onbalans in voorraden die door *cross-channel* retouren kunnen worden veroorzaakt.

Discussie en verder onderzoek

In dit proefschrift hebben we een aantal modellen onderzocht die gerelateerd zijn aan online orderverwerking. In al deze modellen is onzekerheid een belangrijke component. In Hoofdstukken 2 en 3 leidde onzekerheid over de samenstelling van klantbestellingen tot onzekerheid in de routes van orderverzamelaars. In Hoofdstukken 4 en 5 was onzekere klantvraag een belangrijke component in de voorraadmodellen, zoals in veel voorraadbeheersingsstudies uit de literatuur. In Hoofdstuk 4 stond de onzekere gemiddelde klantvraag waaraan kan worden voldaan tijdens de levertijd centraal in de benadering van kosten behorend bij verschillende basisvoorraadniveaubestelstrategieën. In Hoofdstuk 5 was het aantal retouren afhankelijk van de geobserveerde klantvraag, wat leidde tot extra onzekerheid die ongebruikelijk is in voorraadmodellen met retouren.

In de hoofdstukken over magazijnmanagement hebben we de lengte van de route van de orderverzamelarroute geformuleerd als een dynamisch programma. In Hoofdstuk 2 resulteerde dit in triviale dynamisch programmeringsproblemen voor bijna alle routeringsheuristieken, met uitzondering van de *largest gap* heuristiek. Hierdoor kon de verwachte lengte worden geschreven in een gesloten vorm, waaruit direct een lengte per gang kon worden afgeleid. Een dynamisch programmeringsalgoritme om het voorraadlocatiebepalingsprobleem op te lossen kon worden geformuleerd door gebruik te maken van de decompositie van de totale lengte van de orderverzamelingsroute in een lengte per gang. In het dynamisch programmeringsalgoritme worden producten gang voor gang toegewezen.

In Hoofdstuk 3 gaf een herformulering van het oorspronkelijk dynamisch programmeringsprobleem van Ratliff & Rosenthal (1983) aanleiding tot een

aantal mogelijkheden voor verdere analyse. De lengte van de optimale orderverzamelaarsroute kan eenvoudig worden opgesplitst door de totale afgelegde lengte per gang te bepalen. Het is echter waardevol om de lengte per gang vast te stellen als de lengte die moet worden toegevoegd aan de kortste deelroute voor alle klassen van het dynamisch programmeringsprobleem behorend bij de voorgaande gang om tot de kortste deelroute voor alle klassen in de huidige gang te komen. De verwachting van deze incrementele lengtes kunnen numeriek worden bepaald en kunnen worden samengevoegd om te komen tot de totale verwachte lengte van de optimale orderverzamelaarsroute.

De aanname van onafhankelijke vraag naar producten is een belangrijke aanname bij het maken van de stap van deterministische naar stochastische modellen in de magazijnmanagement-hoofdstukken. In de wetenschappelijke literatuur is het gebruikelijk om aan te nemen dat klantvraag onafhankelijk is. Er zijn echter twee manieren om deze aanname te interpreteren. In dit proefschrift hebben we vraag gemodelleerd als onafhankelijke Bernoulli-experimenten. In een alternatieve interpretatie neemt men het aantal producten op een order als gegeven, waarbij de daadwerkelijk gevraagde producten worden bepaald door onafhankelijke trekkingen zonder teruglegging. Een interessante vraag voor toekomstig onderzoek is hoe de resultaten van de twee verschillende vraagmodellen gerelateerd zijn en of de modellen uit dit proefschrift kunnen worden gebruikt voor het andere vraagmodel. De dynamisch programmeringsproblemen geformuleerd in dit proefschrift zouden kunnen worden uitgebreid met een toestandsvariable die het aantal producten dat tot aan de huidige gang verzameld is weergeeft.

Andere interessante onderzoeksrichtingen betreffen het voorraadlocatietoewijzingsprobleem. Terwijl optimale voorraadlocatietoewijzingen zijn bepaald voor *return* routing en bijna optimale toewijzingen voor *S-shape* routing, zijn er geen algoritmes voor optimale voorraadlocatietoewijzingen voor *midpoint*, *largest-gap* en optimale routing.

In de hoofdstukken over voorraadbeheer hebben we steeds een Markov-beslissingsproces geformuleerd om optimale strategieën te bepalen. Door de vloek van dimensionaliteit was het slechts mogelijk voor relatief kleine instanties oplossingen te vinden. Daarom hebben we steeds als doel ge-

had heuristieken te formuleren die goed opschalen naar grotere probleeminstanties. De heuristische strategieën konden vervolgens worden vergeleken met de optimale strategie voor kleine instanties. In Hoofdstuk 4 leidde een methode gebaseerd op een decompositie van kosten per retailer tot een bijna-optimale heuristiek. De kosten per retailer werden gecombineerd tot totale kosten op basis van de kansverdeling van het totale voorraadniveau in de bevoorradingsketen tot aan het centrale magazijn. Centraal in deze combinatie was de aanname van lineaire rantsoenering van tekorten over de retailers; deze aanname is gebruikelijk in de wetenschappelijke literatuur over divergente bevoorradingsketens. Verder onderzoek kan bekijken wat de invloed is van andere rantsoeneringsstrategieën. Daarnaast is het interessant om te kijken naar modellen van bevoorradingsketens met meer echelons.

In Hoofdstuk 5 zijn kosten benaderd voor twee verschillende situaties: een waarin het geretourneerde product wordt verscheept en een waarin deze op de locatie blijft waar het is geretourneerd. Voor beide situaties is aangenomen dat er daarna geen verschepingen meer plaatsvinden. De heuristische strategie bepaalt verschepingen op basis van de geschatte kosten voor beide situaties. In de praktijk zijn er vaak constante kosten gemoeid met voorraadverschepingen, bijvoorbeeld transport- en administratiekosten. Toekomstig onderzoek kan zich richten op de vraag hoe het verschepingsbeleid in dit geval vorm zou moeten krijgen. Het beschouwen van de beslissing per product is hoogstwaarschijnlijk niet efficiënt, aangezien de kosten in geval van verscheping niet volledig aan een enkel product kunnen worden toegerekend. Daarnaast hebben we in ons model bepaalde startvoorraden aangenomen. Het bepalen van startvoorraden waarbij rekening wordt gehouden met toekomstige retouren en hun mogelijke verscheping is een interessant probleem.



university of
 groningen

faculty of economics
 and business

som



Arjan S. Dijkstra
 Order fulfillment:

Warehouse and inventory models

Consumers are increasingly buying their products online. In line with this trend, many online retailers have emerged; either operating only online or employing brick-and-mortar stores as well. Order fulfillment is the process of retailers to supply consumers with products ordered. Many challenges arise when considering the logistics of online order fulfillment. In particular, the cost of warehouse operations in online order fulfillment is substantial. Therefore, there is large potential in improving the efficiency of warehouse processes. Order picking is the most time-intensive part of order fulfillment. Designing efficient order-picking processes is essential to be competitive online. Additionally, selling products both online and offline requires careful management of inventories to make sure customer demands for products can be met at all locations at all times.

In this thesis, we study warehouse-management and inventory-management models related to online retail. We study the length of the routes order pickers travel in warehouses for a number of different routing strategies. We minimize route lengths by determining storage locations for products, based on their turnover rates. We derive analytical optimality criteria by formulating dynamic programs. These criteria are used in methods that determine storage locations for products to improve order-picking efficiency. Furthermore, we study the impact of both lost sales and product returns on inventory processes of online retailers. Optimal policies are calculated and serve as a benchmark for near-optimal heuristics that can effectively be implemented in practice.

Research school SOM
 Faculty of Economics and Business
 University of Groningen
 PO Box 800
 9700 AV Groningen
 The Netherlands

www.rug.nl/feb/research

ISBN 978-94-034-1760-8



9 789403 417608 >