

CAPACITEIT GERICHT ONTWERP VAN ORDERVERZAMELSYSTEMEN

René de Koster

Samenvatting

Bij het ontwerpen van orderverzamelssystemen ten behoeve van magazijnen is het veelal van belang om de prestaties van het ontwerp te bepalen (doorlooptijden, doorzet, bezettingsgraden en dergelijke) en een schatting te geven van het aantal mensen en middelen dat benodigd is om die prestaties te bereiken. Voor dit doel zijn op dit moment slechts weinig geschikte methoden beschikbaar.

Daarom wordt in de praktijk, voor ontwerpen waar de inspanning enigszins gerechtvaardigd is, snel gegrepen naar simulatie.

In dit artikel worden, aan de hand van enige concrete orderverzamelssystemen, (benaderende) kwantitatieve methoden besproken voor het schatten van prestatiegraden als bovengenoemd.

Zulke methoden hebben, vooral in een pril ontwerp stadium, voordeel boven simulatie. Ze vergen relatief weinig inspanning, geven direct resultaat, laten snelle variatie toe in parameters. Ze zijn bovendien soms inzichtelijk, wat wil zeggen, dat de (kwantitatieve) relatie tussen parameters duidelijk wordt.

Ingenieursbureau Groenewout B.V.
Afdeling Logistiek en Automatisering
Postbus 3290
4800 DG Breda
Tel. 076-224600

1. Inleiding

Bij het ontwerpen van magazijninrichtingen, spelen prestatiecriteria een grote rol. Immers, een goed ontwerp kan alleen gemaakt worden, als bepaalde prestaties bereikt kunnen worden tegen lage investerings- en exploitatiekosten.

Deze prestaties kunnen uitgedrukt worden in statische prestatiecriteria, zoals de hoeveelheid opslag-, overslag- en behandelingsruimte voor goederen, maar vooral ook in dynamische prestatiecriteria.

In dynamische prestatiecriteria speelt de tijd een rol. Bijvoorbeeld de hoeveelheid mensen en middelen die benodigd zijn om een bepaalde hoeveelheid goederen volgens bepaalde efficiëntie criteria in een bepaalde tijd te behandelen.

Bij het bepalen van het aantal mensen en middelen dat nodig is om een bepaalde dagelijkse hoeveelheid orderlijnen te ontvangen, in te slaan, uit te slaan, te sorteren, te verpakken en te verzenden, zijn in principe drie soorten hulpmiddelen beschikbaar in het ontwerpstadium.

Deze hulpmiddelen zijn (min of meer) exacte analyse, benaderende analyse en simulatie. Alle methoden gaan uit van een model van de werkelijkheid. Dit model is altijd een benadering, waarin de essentiële eigenschappen van de realiteit gemodelleerd worden, en minder belangrijke weggelaten. De keuze van het model heeft te maken met de analyse methode die men kiest. Bij simulatie kan het model realistischer zijn dan bij exacte analyse.

In de praktijk wordt (min of meer) exacte analyse bijna niet gebruikt. Dit komt vooral doordat vrijwel geen goede methoden beschikbaar zijn voor de problemen van de realiteit.

Bij het bepalen van de capaciteit behoefte wordt vooral gebruik gemaakt van benaderende analyse en simulatie. Beide methoden hebben zowel voor- als nadelen.

Ondanks alle bekende voordelen is simulatie relatief duur. Dit komt, omdat gegevens verzameld moeten worden, het model moet gemaakt en geprogrammeerd worden. Het verkrijgen van resultaten kost vrij veel tijd, doordat vaak lange runs nodig zijn om statistisch valide uitspraken te kunnen doen. Daarnaast is het, zeker in het ontwerp stadium, vaak nodig om meerdere modellen met elkaar te vergelijken. Elk van deze modellen moet apart geëvalueerd worden.

Simulatie wordt daarom in het algemeen gebruikt in het definitief ontwerp stadium, waarbij alternatieven reeds afgefallen zijn en waarbij de investeringskosten het gebruik rechtvaardigen. Vaak gaat het dan niet uitsluitend om capaciteitsvraagstukken, maar tevens om besturingsproblemen.

Het gebruik van benaderende berekeningen heeft grote voordelen boven simulatie: het is snel; verschillende alternatieven kunnen binnen korte tijd vergeleken worden. Het bezwaar, dat echter niet altijd onderkend wordt is, dat het gebruikte benaderende model niet altijd de essenties van het probleem weergeeft. Met andere woorden: het gebruikte model behoeft niet alle details van de werkelijkheid te beschrijven, maar de gebruiker moet weten wat de manco's zijn en wat de effecten van deze manco's zijn.

Hoewel het voordeel van het gebruik van benaderende analyses in het ontwerp stadium evident is, wordt bij een enigszins complex ontwerp (te) snel gegrepen naar simulatie. Simulatie is vaak onvermijdelijk, maar pas in een later stadium. Indien mogelijk, dient eerst een benaderende analyse gemaakt te worden om een ruwe schifting aan te brengen tussen de verschillende principe oplossingen.

In dit artikel zal, aan de hand van een aantal concrete orderverzamelsystemen, nader worden ingegaan op benaderende analyse methoden die gebruikt kunnen worden voor het ontwerp van deze systemen. De nadruk ligt op capaciteitsaspecten: hoeveel mensen en middelen zijn nodig, om een bepaalde stroom (te verzamelen goederen) aan te kunnen.

Bij orderverzamelsystemen kunnen twee hoofdprincipes worden onderscheiden. Bij goods-to-man (of, moderner: parts-to-person) systemen worden de te verzamelen goederen naar de orderverzamelaar gebracht. Bij man-to-goods orderverzamelsystemen gaat de orderverzamelaar naar de te verzamelen goederen toe.

Voor beide principes worden enige voorbeelden, met uit de literatuur bekende benaderende analyse methoden, behandeld. De behandelde voorbeelden zijn achtereenvolgens:

- Retriever systemen of, algemener automatische magazijnen met ganggebonden kranen (sectie 2).
- Orderverzamelen met verzameltrucks (sectie 3.1).
- Pick-to-belt systemen (sectie 3.2).

De analyse methoden blijken veelal gebaseerd te zijn op een modellering en analyse als een wachtrijsituatie.

2. Goods-to-man systemen

Voorbeelden van goods-to-man orderverzamelsystemen zijn miniload (of algemener: retriever) systemen.

Een miniload bestaat uit een opslag gedeelte en een verzamelgedeelte. Het opslag gedeelte bestaat uit een aantal parallelle gangen, waarin bakken opgeslagen zijn. Deze bakken hebben in het algemeen een compacte afmeting. In de bakken liggen goederen opgeslagen.

In elke gang rijdt één onbemande kraan. Als een kraan opdracht krijgt een bak te halen van een bepaalde lokatie in de gang, rijdt de kraan naar deze lokatie, neemt automatisch de bak uit de lokatie, rijdt naar de kop van de gang en zet daar de bak af op een afzetpositie. Bij de afzetpositie neemt een orderverzamelaar het benodigde aantal stuks uit de bak, en zet de bak met het restant op een inslagpositie. De verzamelde stuks worden bijvoorbeeld in een verzamelbak gelegd, waarna deze op een transportsysteem gezet en afgevoerd wordt.

In Fig. 1 is schematisch een miniload systeem weergegeven. Deze systemen zijn uiteraard alleen geschikt voor bepaalde toepassingen (niet te grote variatie in produktafmetingen en gewichten). In Nederland bestaan ettelijke tientallen van dergelijke systemen.

De terminologie "retriever" systeem wordt algemener gebruikt wanneer de ladingen groter zijn (pallets in plaats van bakken). De kranen zijn dan navenant zwaarder uitgevoerd.

De kraanbesturing kan gebaseerd zijn op het uitvoeren van enkelspelen of dubbelspelen (of mengvormen). Bij een enkelspel wordt elke opdracht (inslag of uitslag) separaat uitgevoerd. Een inslag bestaat uit het naar de kop van de gang rijden, het opnemen van de "lege" ladingdrager en het in de stelling zetten. Een uitslag is analoog. Bij een dubbelspel wordt door de kraan telkens een inslag gecombineerd met een uitslag. De "lege" ladingdrager wordt ingeslagen op een vrije lokatie (bijvoorbeeld op de lokatie waar de volle ladingdrager vandaan kwam). In het algemeen wordt in de besturing gestreefd naar het uitvoeren van dubbelspelen.

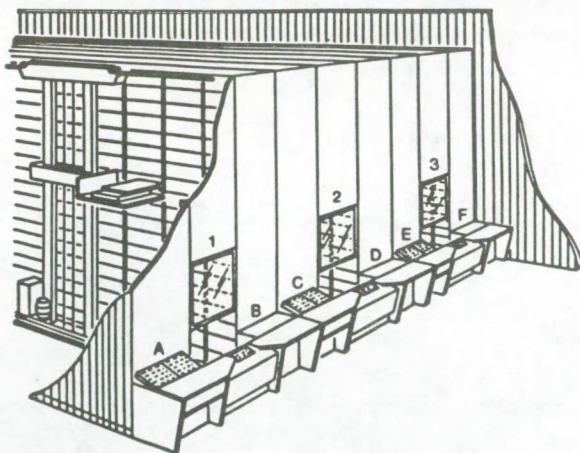


Fig. 1. Een miniload orderverzamelsysteem met drie gangen, met elk een kraan. Bron: Warehouse Modernization and Layout Planning (1978).

Voor de opslag van artikelen in de gangen zijn verschillende strategieën mogelijk.

Bij random opslag wordt een artikel op een willekeurige geschikte lokatie opgeslagen, ongeacht de pickfrequentie van het artikel. Informatietechnisch is dit de meest simpele oplossing.

Bij klasse-georiënteerde opslag, worden de artikelen onderverdeeld in een aantal pickfrequentie klassen. Een bekende verdeling is in drie klassen: snel-, midden en langzaamlopers (ABC-verdeling). De snellopers hebben per artikel het grootste aantal picks (orderregels) per tijdseenheid en liggen in een opslagzone aan de kop van de gang, de middenlopers iets verder weg en de langzaamlopers achteraan.

Het aantal artikelen en ook het aantal benodigde lokaties per klasse hangt af van de pickfrequentie kromme.

In Fig. 2 zijn twee dergelijke pickfrequentie krommen (waaronder een 20-80 kromme) geschetst. In de geschetste situatie in Fig. 2 hebben 80% van de picks op jaarbasis (een "pick" is het uit de stelling halen van 1 ladingdrager; vaak is dit ook 1 orderregel) betrekking op slechts 20% van de opgeslagen artikelen.

Het is duidelijk, dat de gemiddelde tijd die nodig is om een kraan cyclus uit te voeren (een bak inslaan, rijden naar een lokatie en daar een bak uitslaan en afzetten), afhankelijk is van de opslagstrategie die gevolgd wordt.

Bij een klasse-georiënteerde opslag en een verdeling van de artikelen in twee of drie klassen (of meer) is precies bekend wat de optimale vorm (optimaal met betrekking tot eerdergenoemde kraancyclustijd) is van de opslagzones en ook hoe groot de opslagzones moeten zijn, bij een bepaalde servicegraad. De optimale vorm van de zones is rechthoekig.

De grootte van de zones hangt af van het aantal klassen en de vorm van de pick frequentie kromme. Zie Rosenblatt en Eynan (1989).

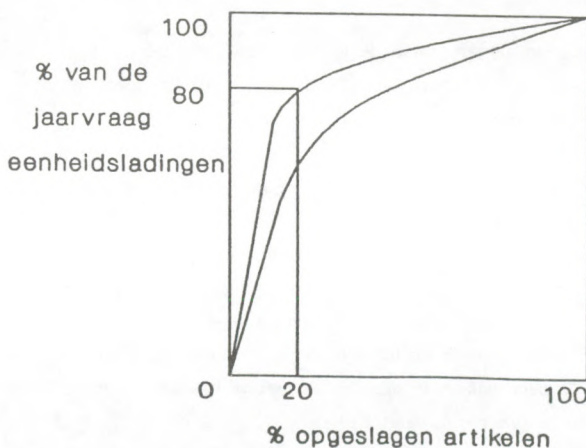


Fig. 2. Twee pickfrequentiekrommen, waaronder een 20-80 kromme.

Analysemethoden

Baanbrekend werk met betrekking tot klasse-georiënteerde opslag bij retriever systemen met ganggebonden kranen is gedaan door Hausman et al. (1976). Zij geven een gesloten uitdrukking voor de gemiddelde kraanrijtijd per enkelspel bij klasse-georiënteerde opslag. Hiermee tonen zij bijvoorbeeld aan, dat bij opslag in drie klassen, de gemiddelde enkelspelrijtijd per kraan bij een 20-80 kromme, met 44% verbetert ten opzichte van random opslag. Bij een 20-90 kromme is dit relatief verbeteringspercentage al opgelopen tot 63%.

Indien een retriever systeem met ganggebonden kranen ontworpen moet worden, is allereerst het benodigde aantal gangen (en dus kranen) van belang, om een bepaald aantal picks per tijdseenheid te kunnen realiseren. Vaak heeft elke gang tevens een eigen orderverzamelaar. De investerings- en exploitatiekosten worden dus voor een groot deel bepaald door het aantal gangen.

Opdat een ontwerp *uitvoerbaar* is, moet het voldoende opslagruimte bieden en voldoende doorzet (dat is het gemiddeld aantal uitgeslagen ladingdragers per dag), R , garanderen. Om het *optimaal* te laten zijn moet het aantal gangen, M , minimaal zijn. Het probleem kan dus geformuleerd worden als:

- Minimaliseer M , (1)
- onder de voorwaarden:
- Opslag capaciteit = S (uitgedrukt in m^2 stelling aanzicht oppervlak) (2)
- Systeem doorzet $\geq R$ (3)
- met M integer. (4)

Bij een gegeven aantal benodigde lokaties, kan gevarieerd worden tussen weinig (maar lange, hoge) gangen en veel (maar korte, lage) gangen. In het eerste geval zal de doorzet lager zijn dan in het tweede geval.

Het is relatief eenvoudig een benaderend model te maken van deze situatie. Eén gang met kraan en verzamelaar kan gemodelleerd worden als een gesloten netwerk van twee wachtrijen met bedieningsstations. Het aantal pickposities bij de orderverzamelaar bepaalt het aantal "klanten" (in dit geval bakken of ladingdragers) gelijktijdig in beweging in het systeem. De verzamelaar en de kraan zijn de bedieningsstations.

De bedieningstijd van de kraan, ingeval van besturing middels dubbelspelen, bestaat uit de tijd nodig om de oude bak in te slaan en de nieuwe bak uit te slaan. Het is duidelijk dat deze tijd afhangt van de gekozen opslagstrategie.

Een dergelijk model is geformuleerd door Bozer en White (1990) en door hen opgelost in de volgende situatie:

- Ganggebonden kranen met één orderverzamelaar per gang.
- Random opslag van artikelen in de stellingen.
- Constante, of exponentieel verdeelde verzameltijd per ladingdrager op de pickstations.
- Twee pickposities per pickstation.

De benodigde invoerparameters zijn de snelheden (horizontaal en verticaal) van de kranen, de inslag en uitnametijd van een ladingdrager uit de stelling (inclusief positionering, exclusief rijden) door de kraan, de gemiddelde benodigde picktijd per ladingdrager door de verzamelaar en verder de geëiste waarden van R en S. Daarnaast kan opgegeven worden welke vorm de stellingen hebben, middels een vormfactor. Deze vormfactor is de verhouding tussen de horizontale rijtijd van de kraan tot het eind van de stelling en de heftijd tot de bovenste lokatie. De optimale (met betrekking tot de gemiddelde cyclustijd van de kraan) vormfactor is 1 (zie bijvoorbeeld Bozer en White, 1984). Echter, voor realisatie van retriever systemen in bestaande gebouwen is het soms nodig andere lengte - hoogte verhoudingen van de stellingen te kiezen.

Zij maken gebruik van een formule om de gemiddelde cyclustijd van de kraan uit te rekenen, welke ontwikkeld is in Bozer en White (1984).

Het algoritme van Bozer en White (1990) bestaat uit het geleidelijk opvoeren van het aantal gangen (onder restrictie (2)), de doorzet uitrekenen door analyse van het wachtrijmodel en telkens te kijken of reeds voldaan is aan restrictie (3). Zodra voor de eerste keer voldaan is aan deze restrictie, is het optimale aantal gangen bereikt. Het algoritme is eenvoudig te implementeren en geeft een eerste, snelle indruk hoeveel gangen gerealiseerd moeten worden. Door de opgegeven waarde voor S en de vormfactor, is tevens bekend hoe lang en hoog de gangen ongeveer moeten worden.

3. Man-to-goods systemen

Van de vele verschillende man-to-goods orderverzamelsystemen, worden hier twee veel voorkomende vormen behandeld. Allereerst het orderverzamelen met speciale orderverzameltrucks (meestal uit palletstellingen). Verder het orderverzamelen middels zogenaamde pick-to-belt orderverzamelsystemen.

3.1 Verzamelen met orderverzameltrucks

Bij het verzamelen met behulp van orderverzameltrucks zijn een aantal zaken van belang. We veronderstellen dat de layout, dus het aantal en de afmetingen van de gangen, gegeven is.

Allereerst moet de gevraagde doorzet gehaald kunnen worden. Dit leidt tot een minimum benodigd aantal orderverzameltrucks. Daarnaast kunnen andere doelstellingen meespelen. Voorbeelden zijn: het wachtende aantal opdrachten mag niet te groot worden, of de gemiddelde doorlooptijd mag niet te groot worden. Dergelijke nevendoelestellingen kunnen uitgedrukt worden in kosten per tijdseenheid.

Laten we als voorbeeld definiëren:

- C_w = kosten per tijdseenheid per orderregel terwijl de orderregel wacht om gepickt te worden. Deze kostenfactor is van belang bij bijvoorbeeld afhaalklanten, of situaties waarin een korte doorlooptijd van belang is.
- C_o = kosten per tijdseenheid van een orderverzameltruck, inclusief orderverzamelaar. Hierbij kan gedacht worden aan enerzijds afschrijving, energie en onderhoud, anderzijds aan loonkosten.
- M = aantal orderverzameltrucks.
- L = gemiddeld aantal orderregels dat wacht om gepickt te worden.

Het probleem kan nu geformuleerd worden als:

$$\text{minimaliseer de gemiddelde totale kosten per tijdseenheid, ofwel } LC_w + MC_o, \quad (5)$$

onder de voorwaarde:

$$\text{doorzet} = \text{geëiste doorzet } R \quad (6)$$

Er is een trade-off tussen het aantal orderverzameltrucks, M , en het aantal wachtende opdrachten, L . Als het aantal trucks toeneemt, dan neemt het aantal wachtende opdrachten af.

Analyse

Een dergelijke situatie kan gemodelleerd worden als een wachtrijsituatie met een aantal parallelle loketten voorafgegaan door één wachtrij met opdrachten. Het aantal parallelle loketten wordt bepaald door het aantal orderverzameltrucks dat orderregels verzamelt in één gebied. De geëiste doorzet of capaciteit van de trucks (R), is het aantal orderregels dat daadwerkelijk in het betreffende gebied verzameld moet worden door de trucks per dag.

Veronderstel nu, dat orderregels on-line (op willekeurige momenten) binnenkomen gedurende de dag en dat elke orderregel een opdracht is, die apart verzameld moet worden. In dat geval is een vrij goede benadering voor het aantal wachtende orderregels:

$$L = \frac{1}{2} r^2 (1 + C^2) / (1 - r) \quad (7)$$

Hierbij is r de bezettingsgraad van het totale systeem: $r = R_s/M$, met s de gemiddelde verzameltijd van een opdracht. Verder is C de variatiecoëfficiënt van de verzameltijd per opdracht. De variatiecoëfficiënt is 0 als de orderverzameltime constant is, en 1 als de orderverzameltime exponentieel verdeeld is.

Formule (7) is exact, voor het geval de tussenaankomsttijd van opdrachten exponentieel verdeeld is en het aantal orderverzameltrucks, M , gelijk is aan 1. In dat geval is dit de bekende Pollaczek-Khintchine formule (zie bijvoorbeeld Kleinrock, 1975).

Het is mogelijk aanmerkelijk betere benaderingen te krijgen voor L (en andere grootheden) dan die van formule (7). Zulke benaderingen leiden echter tot minder inzichtelijke formules. Voor een overzicht van goede benaderingsmethoden verwijzen we naar Van Hoorn (1984).

Een oplossing van het systeem onder (5) en (6) kan verkregen worden, door eerst M te kiezen zodanig dat aan (6) voldaan is. Dat kan door $r < 1$ te maken, met M zo klein mogelijk, ofwel

$$M > R_s, \text{ met } M \text{ geheel en } M \text{ zo klein mogelijk.} \quad (8)$$

Vervolgens wordt, zolang de kosten per tijdseenheid onder (5) afnemen, M opgehoogd, totdat deze kosten weer toenemen. Dit bepaalt het optimale aantal orderverzameltrucks.

Deze methode is snel, en redelijk nauwkeurig. Andere prestatiecriteria, zoals de gemiddelde wachttijd per opdracht, zijn eveneens eenvoudig af te schatten.

In Tabel 1 is een voorbeeld gegeven van het minimum en optimum aantal benodigde orderverzameltrucks, bij variërende orderverzameltime en andere parameters constant. Voor de gekozen waarden van de orderverzameltime, varieert de bezettingsgraad bij het minimum benodigde aantal trucks, $r_{\min}$, van 75% (voor gemiddelde verzameltijd 0,25) tot 94,7% (voor gemiddelde verzameltijd 2). Verder zijn, voor de gekozen waarden van $C_w=1$ en $C_o=45$ het minimum en optimum aantal trucks steeds gelijk. In deze tabel is gebruik gemaakt van formule (7) voor de berekening van (5).

Tabel 1. Minimum en optimum aantal trucks als functie van de gemiddelde verzameltijd per opdracht. $R=9$, $C^2=1$, $C_w=1$, $C_o=45$.

Aantal trucks	Gem. verzameltijd, s				
	2	1	0,5	0,25	0,1
min. aantal trucks	19	10	5	3	1
opt. aantal trucks	19	10	5	3	1

Bij grotere waarden van C_w ten opzichte van C_o , zal het optimum aantal trucks gaan afwijken van het minimum aantal trucks. Het optimum aantal trucks zal ook gaan afwijken van het minimum aantal trucks, als de bezettingsgraad $r_{\min}$ nadert tot 1, zodat het aantal wachtende opdrachten sterk toeneemt. Dit blijkt uit onderstaande Tabel 2. Tussen haakjes staat steeds het systeembezettingspercentage aangegeven.

Tabel 2. Minimum en optimum aantal trucks bij variërende waarden voor C_w en R (aantal te verwerken opdrachten per tijdseenheid). $s=0,1$; $C^2=1$; $C_o=45$.

Aantal trucks	$R=9$	$R=9,8$	$R=9$	$R=9$	$R=9$
	$C_w=1$	$C_w=1$	$C_w=6$	$C_w=300$	$C_w=800$
min. aantal trucks	1 (90)	1 (98)	1 (90)	1 (90)	1 (90)
opt. aantal trucks	1 (90)	2 (49)	2 (45)	3 (30)	4 (22,5)

Het probleem met het gebruik van formule (7) is, dat zowel de verzameltijd per opdracht, s , als de variatiecoëfficiënt in de verzameltijd per opdracht, C , vaak moeilijk te schatten zijn in de praktijk. De gevoeligheid van formule (7) voor afwijkingen in de variatiecoëfficiënt is beperkt. Deze is meestal niet veel groter dan 1. Formule (7) is echter gevoelig voor variaties in de gemiddelde orderverzameltijd (bij gegeven andere parameters).

Ook het minimum benodigde aantal trucks is evenredig met de gemiddelde orderverzameltijd.

Dat de orderverzameltijd vaak moeilijk te schatten is heeft verschillende oorzaken:

- Afhankelijk of al dan niet klasse-georiënteerde opslag wordt gebruikt, is het moeilijker de orderverzameltijd te schatten.

- Orderverzameltrucks rijden vaak in meer dan één gang. Als een opdracht toevallig in een andere gang gehaald moet worden, moet de truck van gang wisselen. Speciaal voor smalle-gangen hoogbouwtrucks is de gangwisseltijd aanzienlijk.
- Het kan zijn dat het aantal orderverzameltrucks dermate hoog is, dat deze elkaar regelmatig in de weg rijden. Dit geeft af en toe een verhoging van de orderverzameltijd. Bij teveel trucks kan het effect van een extra truck uiteindelijk zelfs negatieve effecten hebben op de doorzet.

In de praktijk werkt een truck bovendien vaak aan meer dan één opdracht tegelijk: hij verzamelt bijvoorbeeld alle orderregels, die gehaald moeten worden uit het gebied van de truck, voor één klant. Of hij verzamelt orderregels van een groep klanten, voor zover ze in één rit fysiek (voor wat betreft gewicht, afmetingen) meegenomen kunnen worden. Daarnaast zijn er speciale hoogbouwtrucks waarmee zowel verzameld kan worden als hele pallets in- en uitgeslagen.

Tot slot wordt de verzameltijd per opdracht beïnvloed door het route-algoritme waarmee de truck rondrijdt, in geval een opdracht uit meerdere picks bestaat.

Bovengenoemde overwegingen leiden tot extra complicaties.

In het algemeen echter, leidt de modellering als een eenvoudige wachtrijsituatie met een vast aantal trucks, tot een snelle eerste afschatting van prestatiecriteria, zoals gemiddeld aantal wachtende orderregels, wachttijd per orderregel en bezettingsgraden per truck. Door variatie in het aantal trucks kan het optimale aantal bepaald worden.

Bij verzameling van meerdere orderregels in één rondgang, kunnen het aankomst- en bedieningsproces gemodelleerd worden op opdracht niveau, in plaats van op orderregel niveau. Ook dit leidt tot redelijke eerste afschattingen van het benodigde aantal trucks.

3.2 Pick-to-belt orderverzamelsystemen

Een pick-to-belt orderverzamelsysteem bestaat in het algemeen uit een opslaggedeelte en een centraal transportsysteem. In het opslaggedeelte werken een aantal orderverzamelaars, welke orderlijnen verzamelen en deze op het transportsysteem deponeren.

Het transportsysteem vervoert de verzamelde goederen, meestal na deze gesorteerd te hebben naar bestemming, naar een inpak en controle afdeling. Na inpak, controle en eventueel konsolidatie worden de goederen verzonden.

Pick-to-belt systemen komen voor in allerlei vormen. Indien de te verzamelen goederen dozen zijn, kunnen ze voorzien worden van een barcode en meteen op de band gelegd. De barcode wordt gelezen door een scanner en de doos wordt automatisch naar het goede inpakstation getransporteerd.

In een andere, relatief veel voorkomende, vorm van zulke systemen, worden de goederen verzameld in kunststof bakken. Een bak wordt door het transportsysteem vervoerd naar een pickstation, waar goederen verzameld moeten worden. Daar wordt de bak uitgesluisd. De verzamelaar leest de in de bak liggende verzamelopdracht voor zijn sectie, haalt de goederen uit de stellingen en stopt ze in de bak. Vervolgens wordt de bak terug op de hoofdtransportbaan gezet, waarna hij getransporteerd wordt naar het volgende verzamelstation, indien nog meer goederen in dezelfde bak verzameld moeten worden, óf hij gaat naar een voorbestemd inpakstation.

In één bak worden meestal orderregels verzameld voor één klantenorder. Een pick- of uitsluisstation bedient een afgescheiden deel van het opslaggebied.

Dergelijke pick-to-belt systemen zijn zeer flexibel in zowel capaciteit (aantal bakken per uur, dat gepickt kan worden) als in de opgeslagen artikelen. Door meerdere uitsluisstations met verzamelaars te bouwen, of meer verzamelaars per station in te schakelen kan de verzamelcapaciteit worden uitgebreid. Door één verzamelaar meerdere stations te laten bedienen kan de capaciteit worden verminderd.

Bij het ontwerp van dergelijke systemen spelen capaciteits criteria een grote rol: hoeveel bakken per uur kunnen verzameld worden, hoeveel pickstations moeten gebouwd worden, hoeveel orderverzamelaars zijn nodig, wat is het effect van de layout van het systeem (bijvoorbeeld lengte) op de doorlooptijd etc.

Analyse

Een mogelijkheid om dergelijke vragen te beantwoorden is, om een benaderende analyse uit te voeren. In De Koster (1991) wordt een eenvoudige methode beschreven voor pick-to-belt systemen met verzamelbakken.

De benaderingsmethode is gebaseerd op een modellering als een Jackson netwerk van stations met wachtrijen, waarbij de transportsecties als speciale stations gemodelleerd worden.

Jackson netwerken hebben het grote voordeel dat ze eenvoudig analyseerbaar zijn. Dit komt door de zogenaamde decompositie eigenschap: het netwerk gedraagt zich (in evenwicht) als een verzameling losse stations, waarbij elk station apart geanalyseerd mag worden. Zie Gelenbe en Pujolle (1987).

Als voorbeeld is in Fig. 3 schematisch een klein bakkensysteem geschetst. Het systeem in Fig. 3 bestaat uit 3 pickstations en 4 transportstukken. Elk pickstation bedient een gedeelte van de opslagstellingen, welke dwars op de hoofdtransportbaan geplaatst zijn. Bakken waarin orders verzameld moeten worden, worden op de baan gezet op positie (*).

Veronderstel nu dat in elke bak precies twee orderregels verzameld moeten worden, en dat voor elke orderregel de kans dat deze verzameld moet worden op een bepaald pickstation $1/3$ is, voor elk van de pickstations. Deze kans hangt af van de hoeveelheid opgeslagen artikelen per station en van de omloopsnelheid van deze artikelen.

Als we dit systeem van afstand zouden beschouwen, dan zouden we constateren dat als een groot aantal bakken op het transportsysteem geplaatst wordt, $5/9$ deel

($= 1 - (2/3)^2$) van deze bakken naar pickstation 1 gaat, $5/9$ naar pickstation 2 en $5/9$ naar pickstation 3. Het is niet meer mogelijk onderscheid te maken tussen de bakken onderling: het is niet mogelijk te zeggen welke bak naar welk(e) station(s) is gegaan.

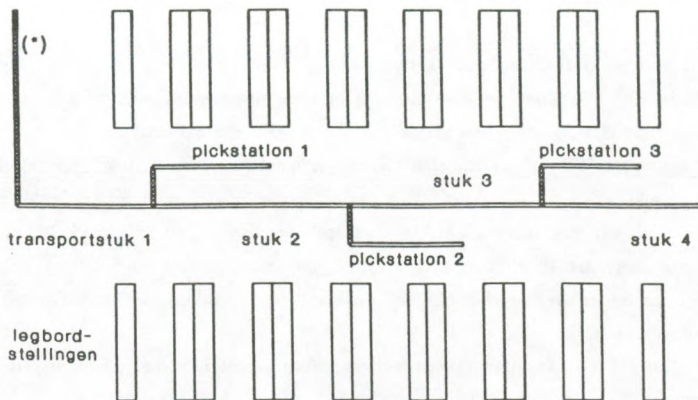


Fig. 3. Centrale transportinstallatie, bestaande uit 4 delen met 3 pickstations. Bakken worden op de baan geplaatst op positie (*). Aan het eind van transportstuk 4 worden de bakken van het systeem gehaald.

Deze overwegingen leiden tot een benaderingsmethode waarbij voor elke bak, na bediening in een pickstation of transportstation, met een bepaalde kans geloot wordt naar welk volgend transportstuk, of pickstation de bak gaat. Deze kansen zijn onafhankelijk van de bak en gebaseerd op (de kansverdeling van) het aantal te verzamelen orderregels in de bak en de kans dat een orderregel verzameld moet worden op een bepaald station. Uiteraard kan een dergelijke benaderingsmethode alleen goede resultaten geven wanneer dagelijks een voldoende groot aantal bakken verwerkt moet worden door het systeem.

Als een bak uitgesluisd wordt, duurt het een bepaalde tijdsduur voor hij weer op de baan geplaatst wordt. Deze tijdsduur hangt af van het aantal orderregels dat gepickt moet worden in de bak op het betreffende station en van de verzameltijd per orderregel.

De totale bedieningstijd van een bak op een station kan met een exponentiële verdeling benaderd worden, zodanig dat de gemiddelde bedieningstijd per bak gelijk is aan de totale gemiddelde verzameltijd van het verwachte aantal orderregels dat in een, op het pickstation uitgesluisde, bak gepickt moet worden.

Verder wordt een transportsectie met een (meestal constante) snelheid van v bakken per tijdseenheid, waarop bijvoorbeeld maximaal 10 bakken geplaatst kunnen worden, gemodelleerd als een exponentieel station met snelheid $v/10$ en met 10 servers.

Het op een dergelijke wijze benaderde systeem wordt nu genalyseerd als een Jackson netwerk. Meer gedetailleerde informatie over deze benaderingsmethode kan gevonden worden in De Koster (1991).

Als voorbeeld zijn in Tabel 3 resultaten gegeven voor een systeem met layout soortgelijk als die in Fig. 3, waarbij in elke bak één of twee orderregels verzameld moeten worden, elk met kans 0,5. Het verschil met de layout van Fig. 3 bestaat daaruit, dat er 6 stations zijn en 7 baanstukken. Elke te verzamelen orderregel moet met kans $1/6$ op pickstations 1, 2, 3, 4, 5 of 6 gepickt worden. De verzameltijd per orderregel is exponentieel verdeeld, met gemiddelde 60 sec voor alle zes pickstations. De baanstukken kunnen alle 10 bakken bevatten, behalve het eerste stuk, dat 20 bakken kan bevatten. De transportsnelheid is constant 0,5 bakken per sec. Het aantal te verwerken bakken bedraagt 0,05 bakken per sec. Op elk station werkt 1 ordervverzamelaar.

In Tabel 3 zijn resultaten van de benadering vergeleken met gedetailleerde simulatie van dit systeem.

De prestatiematen die vergeleken worden, zijn de gemiddelde doorlooptijd per bak, bezettingsgraden van de stations (dus van de ordervverzamelaars) en de gemiddelde vulling van het systeem.

Tabel 3. Vergelijking van simulatie met benadering.

Bezettingsgraad van pickstations

<u>pickstation</u>	<u>simulatie</u>	<u>benadering</u>	<u>rel.fout (%)</u>
1	0,751	0,767	-2,1
2	0,744	0,767	-3,1
3	0,743	0,767	-3,2
4	0,784	0,767	2,2
5	0,718	0,767	-6,8
6	0,767	0,767	0,0
Gemiddeld aantal bakken in systeem	29,2	27,8	4,8
Gem. doorlooptijd per bak (sec)	584,6	555,7	4,9

De conclusie die getrokken kan worden uit Tabel 3 is, dat de benaderende methode voor dit geval vrijwel dezelfde voorspelling geeft voor de prestatie van het systeem als simulatie. Gezien de bezettingsgraden van de pickers zou overwogen kunnen worden om het systeem te bemannen met één station en picker minder (of pickers meerdere stations laten bedienen). Dit kan zowel een besparing in investerings- als exploitatiekosten betekenen. Overigens moet er natuurlijk rekening mee gehouden worden, dat bij vermindering van het aantal pickers, de bedieningstijd per orderregel gaat toenemen (omdat de loopafstanden langer worden).

Ook bij complexere systemen blijft de benaderende methode goed presteren. Zie De Koster (1991).

Het grote voordeel van de benaderende methode is, dat het mogelijk is om snel verschillende layouts, andere aantallen pickers, andere orderverzameltijden, snelheden en dergelijke te analyseren. Dit in tegenstelling tot simulatie, waarbij andere layouts vaak modelwijziging tot gevolg hebben.

4. Conclusie

Bij het ontwerpen van inrichtingen van magazijnen is het mogelijk bepaalde (benaderende) kwantitatieve methoden te gebruiken voor het schatten van prestatieparameters als doorlooptijden, doorzet, bezettingsgraden en dergelijke.

Zulke methoden hebben, vooral in een pril ontwerp stadium, voordeel boven simulatie. Ze vergen relatief weinig inspanning, geven direct resultaat, laten snelle variatie toe in parameters. Ze zijn bovendien soms inzichtelijk, wat wil zeggen, dat de (kwantitatieve) relatie tussen parameters duidelijk wordt: zie bijvoorbeeld formule (7).

Het aantal beschikbare gereedschappen is echter (nog) beperkt.

Goede gereedschappen zijn beschikbaar voor

- Automatische magazijnen met ganggebonden kranen en in- en uitslag van eenheidsladingen.
- Miniload systemen met ganggebonden kranen met één picker en twee pickposities per gang.
- Pick-to-belt orderverzamelsystemen.

Daarnaast kunnen in sommige gevallen met succes andere wachtrijmodellen gebruikt worden. Een nadeel is echter, dat de wachtrijmodellen snel complex kunnen worden, bijvoorbeeld omdat batches, of complexe prioriteitsregels een rol spelen.

ontvangen	9 - 9-1992
geaccepteerd	1 - 12-1992

Literatuur

Bozer, Y. en J.A. White, Travel-time models for automated storage/retrieval systems, IIE Transactions 16, 329-338, 1984.

Bozer, Y. en J.A. White, End-of-aisle order picking systems, Management Science 36, 852-866, 1990.

Gelenbe E. en G. Pujolle, Introduction to Queueing Networks, John Wiley, 1987.

Hausman, W.H., L.B. Schwartz en S.C. Graves, Optimal storage assignment in automatic warehousing systems, Management Science 22, 567-579, 1976.

Van Hoorn, M.H., Algorithms and approximations for queueing systems, CWI Tract 8, Centrum voor Wiskunde en Informatica, Amsterdam, 1984.

Kleinrock, L., Queueing Systems - Volume I: Theory, John Wiley, 1975.

De Koster, René, Capacity oriented design of pick-to-belt orderpicking systems, 1991. Verschijnt in European Journal of Operational Research.

Rosenblatt, M.J. en A. Eynan, Deriving the optimal boundaries for class-based automatic storage/retrieval systems, Management Science 35, 1519-1524, 1989.

Warehouse Modernization and Layout Planning Guide, Department of the Navy, Navy Supply Systems Command, NAVSUP Publication 529, 1978.