

# Opslag strategieën in een multi-deep magazijn

J. MANDERS

Universiteit Twente.  
Technische Wiskunde

18 juli 2016

## Samenvatting

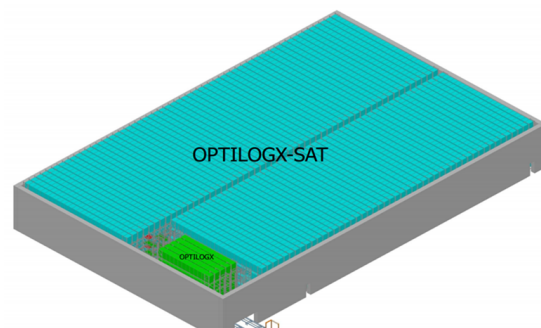
*In dit onderzoek wordt het gebruik van een multi-deep automatisch magazijn inclusief bufferopslag bekeken. Hierbij wordt onderzocht wat de beste vrachtwagen oproep strategie is en hoeveel pallets er per dag kunnen binnenkomen en vertrekken. Er worden 2 verschillende storage assignment strategieën toegepast, A en B. Het voornaamste verschil is dat er bij strategie B pallets geëvacueerd moeten worden. Met behulp van discrete event simulatie wordt het opslaan en uitleveren van de pallets gesimuleerd voor beide strategieën. Daarnaast worden verschillende aspecten van het systeem analytisch onderzocht. Uit de simulaties blijkt dat bij strategie A het magazijn een gemiddelde bezettingsgraad van 80% heeft en het gemiddeld 46 minuten duurt totdat een halende vrachtwagen weer kan vertrekken. Bij strategie B zijn deze cijfers 85% bezettingsgraad en 58 minuten afhandeltijd. Deze uitkomsten gelden wanneer er gemiddeld 9 halende en 9 brengende vrachtwagens per dag aankomen, die gemiddeld 13,5 pallets opvragen of brengen.*

**Trefwoorden:** discrete event simulatie, multi-deep, storage assignment strategie, OptilogX-SAT

## 1. INLEIDING

Een groot automatisch magazijn is gekocht door *Magnastore*. Dit magazijn gaat gebruikt worden door verschillende klanten om pallets op te slaan. Het magazijn bestaat uit 2 onderdelen, de OptilogX en een SAT, zie Figuur 1. De OptilogX kan gebruikt worden als buffer, de SAT is het magazijn voor lange termijn opslag. Tijdens een dag komen nieuwe pallets aan met een bepaald product van een specifieke klant, deze moeten opgeslagen worden. Daarnaast komen er orders binnen waarbij de opgevraagde pallets van die klant zo snel mogelijk uitgezonden moeten worden. De rijen van het magazijn zijn georganiseerd als LIFO, alleen vanaf de midden gang kunnen de pallets bereikt worden. De opvraag van pallets gebeurt echter als FIFO, de pallet die het langst staat wordt als eerste opgevraagd. Hierdoor staat een opgevraagde pallet dus vaak ach-

teraan in een rij, waardoor deze niet direct uitgeleverd kan worden. Vanuit *Ortec* is er gevraagd om inzicht te krijgen in dit probleem en om een mogelijke strategie te ontwikkelen voor het gebruik van dit magazijn.



**Figuur 1:** Een weergave van het magazijn. De OptilogX is groen en de SAT is blauw gekleurd.

Eerst wordt een zeer eenvoudige strategie gebruikt, om de simulatie werkend te krijgen en het probleem te analyseren. Hierdoor komen verschillende problemen aan het licht. Vervolgens worden een vrachtwagen oproep strategie, die deze problemen verhelpt en een andere gebruiksstrategie, die het magazijn efficiënter gebruikt, geïmplementeerd. Met behulp van een discrete event simulatie worden deze strategieën en het gedrag van het magazijn geanalyseerd. Het doel is om te onderzoeken wat de capaciteit van het magazijn is. Men wil dus weten hoeveel pallets er per dag kunnen aankomen en hoeveel orders er per dag verwerkt kunnen worden. Hierbij wil men natuurlijk dat de orders zo snel mogelijk klaar zijn voor vertrek. Er zal een aantal prestatie-maten uitgerekend worden waaraan de kwaliteit van de strategie af te leiden is, waaronder de wachttijd van de vrachtwagens.

In hoofdstuk 2 worden eerst de beschikbare data en de belangrijkste aannames op een rijtje gezet. Vervolgens wordt in hoofdstuk 3 een overzicht gegeven van de literatuur over automatische magazijnen. Het simulatie model wordt in hoofdstuk 4 omschreven. Vervolgens wordt het systeem analytisch en numeriek onderzocht in de hoofdstukken 5, 6 en 7. De resultaten hiervan worden gepresenteerd in hoofdstuk 8, met daarbij een toelichting. Tot slot volgt de discussie en conclusie in hoofdstukken 9 en 10.

## 2. PROBLEEMSTELLING

### 2.1. DATA

Van het bestaande magazijn zijn verschillende data beschikbaar. De OptilogX, ook wel de box, heeft 5 levels met 5 rijen per level en 13 pallet posities per rij, dus in totaal 325 pallet posities. Er zijn 2 liften aan de voorkant en 2 liften aan de achterkant. Per level zijn er 2 shuttles, 1 aan de voorkant en 1 aan de achterkant, die langs de rijen rijden.

De SAT, ook wel het magazijn, heeft eveneens 5 levels en heeft een fishbone layout. De lengte van de gang is 70 meter. Er zijn 57 rijen

met plaats voor 26 pallets en 49 rijen met plaats voor 23 pallets. Hierbij wordt alleen gebruik gemaakt van UK pallets, deze zijn 1,20 meter breed en 1 meter diep. Per level zijn er 2609 pallet posities, dus totaal 13045 pallet posities in de SAT. Ieder level heeft een shuttle die door de gang rijdt en een SIBA die pallets kan overbrengen van de grond naar de shuttle. De SIBA rijdt tevens door de rijen. De snelheden van de SIBA en de shuttle zijn respectievelijk 0,9 m/s door een rij en 1 m/s door de gang. Het oppakken of neerzetten van een pallet door de SIBA duurt 3 seconden. De overdracht van de SIBA op de shuttle duurt 10 seconden. Wanneer een pallet in de box geplaatst moet worden, duurt dit 2 minuten. De SIBA kan alleen door een rij bewegen als de shuttle voor deze rij staat. De ingang van een level van het magazijn bevindt zich bij de lift van de box. Volgens de literatuur, zoals beschreven in hoofdstuk 3 is dit magazijn een single shuttle, unit load, multi-deep magazijn.

Waarschijnlijk zal het magazijn een gemiddelde bezettingsgraad van 90-95% hebben. Aankomende pallets worden pas bekend gemaakt vlak voordat ze arriveren. Wanneer een pallet opgevraagd wordt, moet de pallet met de oudste datum uitgeleverd worden, het liefst binnen 30 minuten. De verwachting is dat er gemiddeld 600 pallets per dag aankomen en dat er evenveel pallets opgevraagd worden. In een periode van 9 uur 's avonds en 's nachts komen er geen pallets of orders binnen. Er kan op dat moment wel herschikking van pallets plaatsvinden.

### 2.2. AANNAMES EN VEREENVOUDIGINGEN

Om onderzoek te kunnen doen, wordt het probleem eerst vereenvoudigd.

- Er wordt slechts 1 level bekeken van het magazijn. Hierdoor is de capaciteit dus 2609 pallets in het magazijn en maximaal 65 in de box. Er worden dan 120 pallets per dag verwacht en evenveel orders.
- Wanneer er plaats in het magazijn is, wordt een pallet direct van de vrachtwagen naar het magazijn verplaatst. Als er geen plaats

in het magazijn is, wordt de box als tijdelijke opslag gebruikt. Er wordt aangenomen dat de capaciteit van de box oneindig groot is. Maar pallets die de box binnenkomen wanneer er al meer dan 65 pallets in de box staan, worden geteld als zijnde geweigerd.

- De SIBA wordt altijd op de shuttle geplaatst wanneer beide buiten gebruik zijn, ze staan dan bij de lift. Hierdoor wordt het onderzoeksgebied van dwell-point positie dus niet meegenomen. Iedere beweging van de shuttle is nu een single command cycle.

- Er vindt geen herschikking in de nacht plaats. De simulatie wordt alleen overdag gedaan.

- Er is slechts 1 bedrijf met 1 product in het magazijn. Alleen de datum van het product is variabel.

Daarnaast wordt een aantal aannames gedaan:

- Zowel de SIBA als de shuttle zijn meteen op snelheid. Hierdoor kan er met een constante snelheid gerekend worden wanneer pallets verplaatst worden.

- Een vrachtwagen staat als het ware in de lift van het magazijn te wachten. De tijd die nodig is om een pallet tussen vrachtwagen en magazijn te verplaatsen is dus de tijd die de shuttle en SIBA nodig hebben om vanaf de lift naar de juiste pallet positie te rijden. De tijd die nodig is om een pallet van de vrachtwagen naar de box te verplaatsen is 2 minuten. De tijd die in praktijk nodig is om de pallet van de vrachtwagen in de lift te krijgen is deterministisch, maar wordt in dit onderzoek op 0 gesteld.

- Pallets worden aaneengesloten geplaatst, er zijn dus geen lege ruimtes tussen pallets in een rij. Iedere pallet wordt ook zover mogelijk achteraan in een rij geplaatst.

- Alle pallets die op een dag aankomen hebben dezelfde productie datum en worden dus als hetzelfde beschouwd.

- De aankomsten van zowel de halende vrachtwagens als de brengende vrachtwagens worden gezien als een Poisson proces met een gemiddelde van  $\mu_H = \mu_B = 9$  per dag.

- Het aantal pallets dat aankomt met een

vrachtwagen of het aantal pallets dat opgehaald wordt, ligt tussen 1 en 26. Volgens [1] passen er namelijk maximaal 26 pallets in een vrachtwagen. Voor het aantal pallets in een vrachtwagen of order wordt een binomiale verdeling met  $n = 25$  en  $p = 0.5$  gebruikt. Vervolgens wordt hierbij nog één pallet opgeteld, om niet op 0 pallets uit te komen.

### 3. LITERATUUR

Veel bedrijven hebben een productie lijn waarbij grondstoffen nodig zijn om uiteindelijk producten in een winkel te krijgen. Een belangrijk onderdeel van dit hele proces is natuurlijk de opslag van grondstoffen of producten in een magazijn. Hierbij wordt tegenwoordig steeds vaker een automatisch magazijn gebruikt waarbij shuttles en kranen door een computer worden aangestuurd waardoor de pallets met producten naar de juiste plaats gebracht worden. In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de literatuur over zulke automated storage en retrieval systems (AS/RS).

#### 3.1. NOTATIE

Om makkelijk te kunnen schrijven over automatische magazijnen worden meerdere begrippen over de indeling van het magazijn gebruikt. Deze worden toegelicht in [2]. Volgens dit artikel zijn de belangrijkste componenten van een AS/RS: rijen, gangen, kranen en I/O punten. In de rijen kunnen pallets geplaatst worden, de gangen zijn de lege ruimtes tussen de rijen waar de kranen (shuttles) kunnen bewegen. I/O punten zijn de in- en uitgang van het magazijn. Wanneer gesproken wordt over unit-load single shuttle magazijnen is er slechts 1 kraan per gang die per keer 1 pallet kan vervoeren. Dit is dus ook het geval in het magazijn van *Magnastore*. Een single-deep magazijn bestaat uit rijen van lengte 1, oftewel iedere pallet kan direct bereikt worden vanaf de gang. In het geval van *Magnastore* is er sprake van een multi-deep inrichting.

### 3.2. BELEID

Bij het optimaliseren van een magazijn kan naar verschillende onderdelen gekeken worden. Ook deze worden beschreven in [2]. Het gaat hier dan om batching, storage assignment, sequencing en dwell-point strategieën. Batching kan alleen gebruikt worden wanneer meerdere pallets tegelijk vervoerd kunnen worden, het gaat dan dus om een order picking volgorde. Bij dwell-point beleid wordt gekeken naar wat de optimale plaats is om de kraan te plaatsen wanneer hij niet gebruikt wordt. Dit zou in het geval van *Magnastore* toegepast kunnen worden op de SIBA. Sequencing gaat over het bepalen van de volgorde van aankomsten en opvragen. Het zou effectief kunnen zijn om bijvoorbeeld de binnenkomende pallets in een buffer te plaatsen en eerst alle opvragen van een dag uit te sturen en daarna pas de binnen gekomen pallets een definitieve plaats te geven. In [3] wordt een aantal heuristieken voor sequencing van aanvragen en aankomsten bekeken voor een multi-deep magazijn, waarbij het doel is om de totale tijd te minimaliseren die nodig is om een verzoek te behandelen. Meestal wordt echter voor vereenvoudiging de FCFS strategie toegepast: wanneer een opvraag of aankomst van pallets binnenkomt, wordt deze direct behandeld. De volgende behandeling begint pas als de vorige is afgehandeld.

Bij *Magnastore* wordt alleen onderzoek gedaan naar de storage assignment strategie. Voorbeelden hiervan zijn; random storage waarbij de pallets op de dichtstbijzijnde open plaats geplaatst worden, full-turnover-based storage waarbij pallets die vaak opgevraagd worden dichtbij het I/O punt geplaatst worden en class-based storage waarbij het magazijn in delen opgedeeld wordt en binnen deze delen een random storage strategie wordt toegepast.

### 3.3. PRESTATIE

Tot slot is het natuurlijk van belang om te kunnen meten hoe goed een strategie werkt in een magazijn. [2] geeft hiervoor een aantal suggesties zoals: verwachte reistijd van de shuttle of wachttijd van producten totdat ze behandeld

worden. [4] is een van de eerste artikelen die geschreven is over AS/RS. Hierin worden de drie storage assignment strategieën beschreven. Uiteindelijk wil men de strategie vinden waarbij de verwachte reistijd van de kranen minimaal is. In artikel [5] worden verschillende reistijd modellen besproken die door de jaren heen gebruikt zijn door verschillende onderzoekers. Het doel van al deze modellen is om de reistijd te minimaliseren. Dit gebeurt door eigenschappen van het magazijn en het gebruik daarvan te veranderen, bijvoorbeeld sequencing regels, batching algoritmes, dwell-point strategieën en capaciteit van de kranen. Wanneer één van deze eigenschappen wordt onderzocht, wordt de storage assignment strategie vaak gekozen als random storage, omdat dit het eenvoudigste is.

Een voorbeeld van zo'n artikel is [6]. Hierin wordt bij een random storage assignment strategie een reistijd model opgesteld. De verwachte reistijd wordt bepaald bij verschillende locaties van I/O punten en dwell point strategieën. Binnen reistijd modellen wordt soms ook nog onderscheid gemaakt tussen single command cycles en dual command cycles, zoals in [5]. Een single command cycle bestaat uit het wegbrengen of ophalen van 1 pallet. Oftewel van het I/O punt naar de opslag plaats en weer terug. Een dual command cycle bestaat uit het wegbrengen en ophalen van 2 verschillende pallets. Oftewel van het I/O punt naar een opslag plaats om weg te brengen, daarna naar een andere opslag plaats om een pallet op te halen en deze naar het I/O punt te brengen. In het geval van *Magnastore* wordt alleen een single command cycles gebruikt voor de eenvoud.

Tot nu toe waren dit allemaal artikelen waarbij het magazijn een single-deep indeling had. In artikelen [7] en [8] wordt gekeken naar een multi-deep magazijn waarbij zowel aan de voorkant (voor plaatsing) als aan de achterkant (voor ophalen) van een rij toegang is tot de pallets. In [7] wordt gezocht naar gesloten uitdrukkingen voor de verwachte reistijd voor verschillende afmetingen van het magazijn. In de meeste artikelen wordt een continue benade-

ring voor de rijen in een magazijn gebruikt binnen reistijd modellen. Deze aanname is echter wel vreemd, want een pallet kan niet op iedere plaats aan de gang geplaatst worden, maar alleen in een rij oftewel discreet. In artikel [7] wordt naast een continue benadering ook gewerkt met discrete uitdrukkingen in het reistijd model. De conclusie is dat de resultaten niet significant verschillen wanneer gewerkt wordt met continue of discrete uitdrukkingen. Wat voor het geval van *Magnastore* bruikbaar kan zijn uit artikel [7] is dat er een schatting gegeven wordt voor het aantal pallets dat verplaatst moet worden bij een gegeven bezettingsgraad van het magazijn.

In [8] wordt verder gewerkt met het model uit [7] waarbij echter rekening wordt gehouden met verschillende producten en hun verhouding. Wel wordt nog steeds gebruik gemaakt van een random storage assignment strategie. In praktijk is dit bruikbaar voor het geval van *Magnastore*, maar in mijn eigen onderzoek wordt slechts 1 product bekeken en is [8] dus niet van belang.

In [9] wordt een ander multi-deep magazijn bekeken waarbij een optimale turnover-based storage strategie en indeling van het magazijn gezocht wordt. Dit magazijn lijkt ook niet op het magazijn van *Magnastore* want de pallets staan op roterende lopende banden in een rij. Wanneer een achterste pallet nodig is, kan de hele rij dus geroteerd worden waardoor de pallet vooraan komt te staan. Het is dan niet nodig om andere pallets te verplaatsen. Dit roteren kost echter wel tijd en die probeert men juist te minimaliseren.

In [10] wordt wel gebruik gemaakt van exact hetzelfde magazijn als in het geval van *Magnastore*. De modellen die hier gemaakt zijn gebruiken onzekere levering van pallets en variabele vraag en zijn gebaseerd op factor afhankelijke opslag. Waar een inkomende pallet geplaatst moet worden en wanneer pallets verplaatst moeten worden zijn de beslissingen die genomen moeten worden. Voor uitvoer van een pallet moet besloten worden waar de andere pallets naar toe verplaatst moeten worden. Het herinrichten van het magazijn wordt

buiten beschouwing gelaten. Het soort model dat gebruikt wordt is een lineair programmeringsmodel.

### 3.4. CONTAINERS STAPELEN

Omdat er weinig literatuur te vinden is over multi-deep magazijnen waarbij pallets verplaatst moeten worden, omdat ze in de weg staan, is er ook gezocht naar literatuur over containers stapelen. Hierbij moeten containers namelijk verplaatst worden wanneer een container nodig is die onderop staat. Dit is dus vergelijkbaar met pallets verplaatsen wanneer de achterste pallet nodig is. Een voorbeeld van een artikel over containers stapelen is [11]. Hierin wil men de tijd die nodig is om een opgevraagde container op te halen minimaliseren. Dit gebeurt door ten eerste een optimale plaats toekenning te ontwerpen voor binnen komende containers. En ten tweede door een heuristisch te gebruiken bij het herschikken van containers tijdens de nacht. Er worden lineaire programmeringsmodellen opgesteld en de resultaten worden vergeleken met een simulatie.

### 3.5. SIMULATIE

Voor algemeen inzicht in hoe een magazijn gesimuleerd moet worden is [12] geschikt. Hierin wordt een conceptueel model opgesteld voor een distributie magazijn. Er wordt aangegeven met welke input, specificaties en output rekening gehouden moet worden. Het resultaat is een flowchart voor een software onafhankelijke simulatie.

## 4. MODEL

Voor het magazijn wordt een discrete event simulatie model gemaakt. In dit hoofdstuk worden de layout (paragraaf 4.1), de gebeurtenissen (paragraaf 4.3) en de prestatie-maten (paragraaf 4.4) van het model beschreven. In paragraaf 4.2 worden de twee geïmplementeerde strategieën toegelicht. In bijlage A staat een lijst van alle gebruikte symbolen.

#### 4.1. LAYOUT

Er wordt gewerkt met een klasse in Python. Dankzij deze klasse worden de pallets als objecten gezien die ieder een eigen plaats en datum aan zich gekoppeld hebben. Om tijdens de simulatie te kunnen bijhouden in welke toestand het magazijn zich bevindt, is er een aantal variabelen aangemaakt die de status van het systeem weergeven. De belangrijkste hiervan is  $R$ , dit is een lijst van rijen. Iedere rij staat voor een rij in het magazijn. De rijen in  $R$  staan gesorteerd op volgorde van afstand tot de lift. Dus de rij die het eerst in  $R$  staat is het dichtste bij de lift, de laatste rij in  $R$  is achteraan in het magazijn. De rijen zijn dus afwisselend links en rechts van het gangpad. Het eerste element van een rij in  $R$  komt overeen met een pallet plaats achteraan in een rij van het magazijn. Het laatste element van een rij in  $R$  is de pallet die het dichtste bij het gangpad staat.  $R$  bevat alleen een element als er in het magazijn een pallet op die plaats staat. De lengte van een rij in  $R$  geeft dus aan hoeveel pallets er in de corresponderende rij in het magazijn staan. Afwisselend hebben de rijen in  $R$  een lengte van maximaal 26 of 23 pallets. Daarnaast zijn er nog andere variabelen gebruikt in het simulatie programma. Deze worden beschreven in bijlage B.

Om er voor te zorgen dat de simulatie zich snel in de evenwichtstoestand bevindt is het magazijn initieel ingericht. Deze initiële inrichting hangt af van de toegepaste strategie, maar heeft een bezettingsgraad van ongeveer 89%.

#### 4.2. STRATEGIE

Voor het modelleren van het magazijn worden twee verschillende strategieën bekeken. Een strategie bestaat uit vier onderdelen: Open plaats zoeken, Pallet ophalen, Evacueren en Initiële inrichting. Deze strategieën kunnen later met elkaar vergeleken worden. Bij beide strategieën geldt dat de prioriteit van acties eerst halende vrachtwagens, dan oudere pallets dan vandaag uit de box halen en tot slot brengende vrachtwagens met pallets vandaag gedateerd is. Een actie wordt altijd eerst afgemaakt, voor-

dat er aan een nieuwe actie begonnen wordt. Er wordt dus niet halverwege gestopt met het leeghalen van een vrachtwagen. Strategie A is een zeer eenvoudige strategie waarbij niet geëvacueerd hoeft te worden. Strategie B maakt gebruik van alle ruimte die er is en kan dus waarschijnlijk een hogere bezettingsgraad aan.

##### 4.2.1 Strategie A

###### Open plaats zoeken

Pallets die opgeslagen moeten worden, worden op de dichtstbijzijnde (vanaf de lift) beschikbare plaats geplaatst. Hierbij worden pallets altijd zover mogelijk achteraan in de rij geplaatst, waardoor pallets dus altijd aaneengesloten staan. Een plaats is beschikbaar als achter deze plaats een pallet staat met dezelfde datum als de pallet die geplaatst gaat worden. In die rij staan dus alleen pallets met de huidige datum. Als zo'n rij niet bestaat wordt een nieuwe pallet in een lege rij geplaatst. Deze rij is dus voor de volgende pallet met dezelfde datum weer beschikbaar. Als er ook geen lege rijen meer aanwezig zijn in het magazijn wordt de pallet die geplaatst moet worden tijdelijk in de box opgeslagen.

###### Pallet ophalen

De pallet die opgehaald moet worden is de pallet met de oudste datum. Deze wordt opgehaald uit de rij die het dichtste bij de lift is. Er staan nooit andere pallets in de weg, omdat er in een rij alleen maar pallets staan die dezelfde datum hebben. De pallet kan dus altijd meteen opgehaald worden en er hoeft dus niet geëvacueerd te worden.

###### Initiële inrichting

De eerste 9 rijen worden volledig leeg gelaten, zodat de initiële bezettingsgraad 89% is. De rest van de rijen bevatten pallets met steeds 121 pallets met dezelfde datum, deze rijen hoeven niet helemaal vol te staan. Zodra een nieuwe datum voorkomt worden deze pallets in een nieuwe rij geplaatst. In iedere rij staan dus pallets met dezelfde datum.

## 4.2.2 Strategie B

### Open plaats zoeken

Pallets die opgeslagen moeten worden, worden op de dichtstbijzijnde (vanaf de lift) beschikbare plaats geplaatst. Hierbij worden pallets altijd zover mogelijk achteraan in de rij geplaatst, waardoor pallets dus altijd aaneengesloten staan. Een plaats is beschikbaar als deze niet direct voor een pallet is met de oudste datum. Een nieuwe pallet wordt dus niet voor de pallets gezet die als eerst opgehaald gaan worden. Verder worden nieuwe pallets ook niet in een volledig lege rij geplaatst, tenzij dit niet anders kan. Iedere rij wordt dus eerst volledig aangevuld, daarna wordt pas aan een nieuwe lege rij begonnen. Er wordt voor gezorgd dat er altijd minstens 1 hele lege rij met lengte 26 en 1 hele lege rij met lengte 23 beschikbaar blijft. Als er geen open plaats meer beschikbaar is (behalve de twee gereserveerde lege rijen), wordt de pallet tijdelijk in de box opgeslagen. Ook wordt er voorkomen dat er meer dan 2 soorten data in eenzelfde rij staan, omdat hierdoor de evacueer strategie niet meer toepasbaar is. Dit zou theoretisch kunnen gebeuren, maar op dat moment wordt de pallet met de derde datum in een nieuwe rij geplaatst. Toelichting hierop wordt gegeven in paragraaf 5.6.

### Pallet ophalen

In eerste instantie worden de pallets die al klaar staan in de box opgehaald. Dit kost 2 minuten per pallet. Als de vrachtwagen dan al het juiste aantal pallets bevat, is de vrachtwagen klaar en wordt er gezocht naar een nieuwe actie. Als er nog meer pallets opgehaald moeten worden, wordt gezocht naar de pallet die het langste staat en het dichtste bij is in het magazijn. Pallets met de oudste datum die direct beschikbaar zijn worden als eerst opgehaald waardoor evacueren zolang mogelijk uitgesteld wordt. Uiteindelijk kan het zijn dat de oudste pallet geblokkeerd wordt door nieuwere pallets. Op dit moment moet er geëvacueerd worden.

### Evacueren

De pallets die geëvacueerd moeten worden hebben een nieuwere datum (1 dag nieuwer) dan de pallet die opgehaald moet worden. De pallets die geëvacueerd moeten worden, worden naar een lege rij verplaatst van dezelfde lengte als de rij waar ze vandaan komen. De pallet met de oudste datum die opgehaald gaat worden, wordt naar de box verplaatst. De pallets die achter deze specifieke pallet staan en dezelfde oudste datum hebben worden ook naar de box verplaatst. Hierdoor is de rij waar oorspronkelijk een pallet uitgehaald moest worden dus helemaal leeg. Meer toelichting op deze strategie met de situaties die voor kunnen komen wordt gegeven in paragraaf 5.6.

### Initiële inrichting

De eerste 11 rijen worden volledig leeg gelaten, zodat de de initiële bezettingsgraad 89% is. De rest van de rijen staat helemaal vol met pallets. Hierbij zijn steeds 121 pallets met dezelfde datum. Iedere rij wordt steeds volledig gevuld, waardoor er dus steeds een aantal rijen is met dezelfde datum en vervolgens een rij waarin 2 verschillende data voorkomen.

## 4.3. GEBEURTENISSEN

Om het magazijn te simuleren wordt gebruik gemaakt van een discrete event simulatie. Hierbij wordt er alleen op discrete tijdstippen iets veranderd aan het systeem. De tijd wordt bijgehouden door een teller en deze springt steeds naar het tijdstip van de volgende gebeurtenis. Om het volgende tijdstip te kunnen bepalen is er een lijst die voor iedere mogelijke gebeurtenis een tijdstip bevat. Dit tijdstip is het tijdstip waarop de bijbehorende gebeurtenis weer voor het eerst zal plaatsvinden. De lijst houdt dus bij wanneer welke gebeurtenis plaats gaat vinden. Iedere keer als de taken bij een gebeurtenis zijn uitgevoerd en er ook eventueel nieuwe gebeurtenissen gepland zijn, wordt de teller voor tijd bijgesteld naar het tijdstip van de eerst volgende gebeurtenis. Het volgende tijdstip is dus steeds het minimum van alle tijdstippen in de gebeurte-

nislijst. In het magazijn van *Magnastore* zijn 10 verschillende gebeurtenissen. Hieronder wordt beschreven wat er moet gebeuren op het moment dat één van deze gebeurtenissen plaatsvindt. Een actie zoals genoemd in paragraaf 4.2 is niet hetzelfde als een gebeurtenis. De actie vrachtwagen leeghalen bestaat uit een reeks gebeurtenissen waarbij iedere pallet uit de vrachtwagen gehaald moet worden.

### 1. Aankomst brengende vrachtwagen

Wanneer er een vrachtwagen aankomt die pallets komt brengen voor opslag, wordt zijn aankomsttijd opgeslagen. Vervolgens wordt een nieuwe **aankomst brengende vrachtwagen** gepland. Als de shuttle vrij is, kan begonnen worden met de vrachtwagen leeg halen, waarbij eerst het aantal pallets in de vrachtwagen uit de binomiale verdeling getrokken wordt. De gebeurtenis **pallet wegzetten** wordt vervolgens aangeroepen. Dit betekent dat het volgende tijdstip van **pallet wegzetten** op de huidige tijd gepland wordt. Als de shuttle nog bezig is, wordt de vrachtwagen in de wachtrij geplaatst.

### 2. Pallet wegzetten

Als een pallet weggezet moet worden, wordt er eerst een plaats gezocht waar de pallet heen gaat. Dit gebeurt door de lijst  $R$  te doorzoeken. De manier waarop is afhankelijk van de toegepaste strategie. Deze open plaats wordt opgeslagen en door het berekenen van de reistijd kan de gebeurtenis **pallet opgeslagen** gepland worden. Daarnaast wordt de shuttle status veranderd naar bezig en het tijdstip voor de volgende pallet wegzetten is  $\infty$ . Op dit moment staat dit namelijk niet in de planning. Als er geen plaats beschikbaar is, wordt de pallet tijdelijk in de box opgeslagen.

### 3. Pallet opgeslagen

Op het moment dat een pallet opgeslagen is, wordt de toestand van het systeem gewijzigd, dus wordt de lijst  $R$  aangepast door er een pallet aan toe te voegen. Daarnaast wordt het aantal pallets in de brengende vrachtwagen met 1 verminderd. Het volgende tijdstip

dat een pallet opgeslagen is, is  $\infty$ . Wanneer het aantal pallets dat nog in de vrachtwagen staat groter is dan nul, zijn er nog pallets die weg gezet moeten worden. Er wordt dus een gebeurtenis **pallet wegzetten** gepland op het huidige tijdstip. Als de brengende vrachtwagen leeg is, wordt er gezocht naar een andere actie in volgorde van prioriteit, waarbij de bijbehorende eerste gebeurtenis op de huidige tijd gepland wordt. De prioriteit is altijd eerst halende vrachtwagens, vervolgens box leeghalen en tot slot brengende vrachtwagens. Als er geen acties meer mogelijk zijn, is de status van de shuttle vrij.

### 4. Aankomst halende vrachtwagen

Wanneer er een vrachtwagen aankomt die pallets komt ophalen, wordt eerst zijn aankomsttijd opgeslagen. Vervolgens wordt een nieuwe aankomst van een **halende vrachtwagen** gepland. Als de status van de shuttle vrij is wordt de gebeurtenis **pallet ophalen** aangeroepen. Waarbij eerst ook het aantal pallets dat opgehaald moet worden, getrokken wordt. Als de shuttle bezig is wordt de halende vrachtwagen in de wachtrij geplaatst.

### 5. Pallet ophalen

Als er een pallet opgehaald moet worden, wordt gezocht naar de plaats waar deze opgehaald moet worden, afhankelijk van de strategie. Deze plaats wordt opgeslagen en de status van de shuttle verandert naar bezig. Het volgende tijdstip van **pallet ophalen** is  $\infty$ . Nu wordt er gekeken of de pallet die opgehaald moet worden direct bereikbaar is. Als dit het geval is wordt de gebeurtenis **pallet opgehaald** gepland, afhankelijk van de reistijd van de shuttle. Als de pallet niet direct bereikbaar is wordt de gebeurtenis **begin evacuatie** gepland op het huidige tijdstip. Daarnaast wordt opgeslagen welke pallets geëvacueerd moeten worden. In het geval dat er geen pallets meer in het magazijn staan die opgehaald kunnen worden, wordt de halende vrachtwagen weggestuurd en wordt er opgeslagen hoeveel orders er geweigerd zijn.



## 6. Pallet opgehaald

Wanneer een pallet is opgehaald, wordt de status van het magazijn aangepast door de lijst  $R$  te veranderen. Het volgende tijdstip waarop een pallet terugkeert is  $\infty$  en het aantal pallets dat opgehaald moet worden, wordt met één verminderd. Nu wordt er gekeken of de halende vrachtwagen klaar is voor vertrek. Als alle benodigde pallets opgehaald zijn, wordt gezocht naar een andere actie in volgorde van prioriteit, waarbij de bijbehorende eerste gebeurtenis op de huidige tijd gepland wordt. Als er geen acties meer mogelijk zijn, is de status van de shuttle vrij. Als er nog wel meer pallets opgehaald moeten worden, dan wordt de gebeurtenis **pallet ophalen** gepland op het huidige tijdstip.

## 7. Begin evacuatie

Op dit moment moeten er pallets geëvacueerd worden. Dit gebeurt naar een gereserveerde compleet lege rij. Hiermee zijn de plaatsen waar de pallets nu staan en de plaatsen waar deze pallets heen gaan bekend. Daarnaast wordt, als onderdeel van de strategie, de oorspronkelijk rij helemaal leeg gehaald, door de pallets die niet geëvacueerd moeten worden, maar dus opgehaald worden, alvast naar de box te brengen. Dankzij al deze informatie kan de gebeurtenis **eind evacuatie** gepland worden, afhankelijk van de reistijd van de shuttle en SIBA die heen en weer gaan rijden. Het tijdstip van de volgende **begin evacuatie** is  $\infty$ .

## 8. Eind evacuatie

Wanneer de evacuatie klaar is wordt de lijst  $R$  aangepast, waarbij dus pallets verwijderd en weer toegevoegd worden op een nieuwe plaats. Op dit moment kan er weer verder gegaan worden met pallets ophalen uit het magazijn, dus wordt gebeurtenis **pallet ophalen** gepland.

## 9. Box leeghalen

Wanneer gebrachte pallets tijdelijk in de box zijn opgeslagen, worden deze bij deze gebeurtenis naar het magazijn verplaatst. Deze gebeurtenis wordt opgeroepen als de shuttle vrij is en er geen wachtende halende vrachtwagens

meer zijn. De actie box leeghalen heeft voorrang op de actie brengende vrachtwagen behandelen. Bij de gebeurtenis box leeghalen wordt eerst gezocht naar een plaats in het magazijn waar de pallet geplaatst kan worden, afhankelijk van de strategie. Als deze bekend is wordt de shuttle bezet en de gebeurtenis **pallet uit box** gepland. De volgende gebeurtenis **box leeghalen** is  $\infty$ .

## 10. Pallet uit box

De pallet uit de box is naar het magazijn verplaatst en dus wordt de lijst  $R$  aangepast. Als de box nog niet leeg is en er nog plek is in het magazijn wordt de gebeurtenis **box leeghalen** weer gepland op het huidige tijdstip. Anders wordt er gekeken of er ondertussen wachtende vrachtwagens zijn. Als dit beide niet het geval is wordt de status van de shuttle veranderd in vrij. De volgende gebeurtenis **pallet uit box** is  $\infty$ .

Daarnaast is er ook nog een einde van de dag. Deze vindt plaats na 15 uur werken. Op dit moment worden er geen nieuwe aankomsten van vrachtwagens meer gepland. Als er nog vrachtwagens zijn die staan te wachten worden deze wel afgehandeld, waarbij halende vrachtwagens voorrang hebben. Ook worden pallets die tijdelijk in de box opgeslagen waren, naar het magazijn gebracht. Wanneer dit alles is afgehandeld, wordt de extra werktijd en de bezettingsgraad berekend. Hierna kan de volgende dag beginnen.

## 4.4. PRESTATIEMATEN

Om te weten hoe het magazijn functioneert, worden er verschillende prestatie-maten gebruikt die iets zeggen over de kwaliteit van de strategie. De prestatie-maten worden hieronder beschreven.

- $W_H$ : Gemiddelde wachttijd halende vrachtwagens. Hiervoor wordt de totale wachttijd van alle halende vrachtwagens gedeeld door het aantal halende vrachtwagens dat wachten heeft voltooid. De wachttijd is de tijd tussen aankomst en in behandeling nemen.

- $W_B$ : Gemiddelde wachttijd brengende vrachtwagens. Hiervoor wordt de totale wachttijd van alle brengende vrachtwagens gedeeld door het aantal brengende vrachtwagens dat wachten heeft voltooid. De wachttijd is de tijd tussen aankomst en in behandeling nemen.

- $BD_H$ : Gemiddelde bedieningsduur voor halende vrachtwagens. Deze bedieningsduur is alleen de tijd waarin er pallets naar de vrachtwagen verplaatst worden, dus exclusief de wachttijd.

- $BD_B$ : Gemiddelde bedieningsduur voor brengende vrachtwagens. Deze bedieningsduur is alleen de tijd waarin er pallets uit de vrachtwagen gehaald worden, dus exclusief de wachttijd.

- $F_p$ : De gemiddelde verblijftijd van de pallets in het magazijn. De verblijftijd van iedere pallet wordt berekend op het moment dat de pallet het magazijn verlaat. Dit is het verschil tussen zijn aankomstdag en vertrekdag.

- $F_{box,B}$ : De gemiddelde verblijftijd in de box van pallets die daar tijdelijk opgeslagen worden voordat ze in het magazijn opgeslagen kunnen worden.

- $F_{box,H}$ : De gemiddelde verblijftijd in de box van pallets die daar tijdelijk opgeslagen worden, totdat ze door een vrachtwagen opgehaald worden.

- $N_e$ : Het gemiddeld aantal pallets dat geëvacueerd wordt. Bij iedere evacuatie wordt het aantal pallets dat verplaatst wordt binnen het magazijn (en dus niet naar de box) geteld.

- $T_e$ : De gemiddelde tijd die nodig is om een evacuatie van een rij uit te voeren. Dit is inclusief de tijd die nodig is om pallets die binnenkort opgehaald worden naar de box te verplaatsen.

- $N_w$ : Is het percentage van pallets dat eigenlijk geweigerd wordt bij brengende vrachtwagens, ten opzichte van het totaal aantal binnenkomende pallets. Deze pallets worden wel meegenomen in het systeem, maar in de praktijk zouden ze het magazijn niet kunnen betreden.

- $N_o$ : Het percentage van de orders dat niet voldaan kon worden, ten opzichte van het totaal aantal orders.

- $T_{ow}$ : De gemiddelde overwerktijd na de reguliere 15 uur werken op een dag. Deze tijd wordt gebruikt om de nog wachtende vrachtwagens af te handelen en pallets van de box naar het magazijn te verplaatsen.

- $R_{sc}$ : De gemiddelde single command cycle reistijd van de shuttle en SIBA samen. Een single command cycle bestaat uit het starten bij de lift, een pallet ophalen/wegbrengen en weer eindigen bij de lift.

- $\rho$ : De gemiddelde bezettingsgraad. Aan het eind van iedere dag wordt de bezettingsgraad uitgerekend door het aantal pallets in het magazijn te delen door het totaal aantal plaatsen in het magazijn.

De statistische tellers die in de simulatie gebruikt worden om deze prestatiegraden te kunnen uitrekenen, worden toegelicht in bijlage B.

## 5. ANALYSE & VERIFICATIE

In dit hoofdstuk wordt het probleem geanalyseerd, waarbij een aantal prestatiegraden analytisch uitgerekend wordt. Hiermee kan de simulatie van strategie A geverifieerd worden. Ten eerste wordt de reistijd van de shuttle berekend in paragraaf 5.1. Vervolgens wordt de evenwichtstoestand (paragraaf 5.2) van de simulatie onderzocht waarbij extra veel aandacht wordt besteed aan de stochastiek van het systeem, zie paragraaf 5.3. In paragraaf 5.4 wordt een deterministische simulatie bekeken en in paragraaf 5.5 wordt alleen het vertrek proces van het systeem beschouwd. Tot slot wordt in paragraaf 5.6 nog extra toelichting gegeven op de werking van strategie B. In bijlage C wordt een overzicht gegeven van de programma's die tijdens de volgende analyses gebruikt zijn.

### 5.1. REISTIJD

Een single command cycle van de shuttle bestaat uit het wegbrengen (of ophalen) van 1 pallet. Hierbij start de shuttle bij de lift met de SIBA op de shuttle. Eerst moet de SIBA van de shuttle af (10 sec), vervolgens wordt de pallet

opgepakt (3 sec) en dan wordt de SIBA weer op de shuttle gezet (10 sec). Vervolgens rijdt de shuttle naar de juiste rij, waar de SIBA weer van de shuttle af gaat (10 sec). De SIBA rijdt naar de juiste pallet positie en zet daar de pallet neer (3 sec). Vervolgens rijdt de SIBA terug naar de shuttle en wordt hij weer op de shuttle geplaatst (10 sec). Tot slot rijdt de shuttle terug naar de lift. Volgens de gegeven data is de tijd die nodig is voor een single command cycle zoals weergegeven in vergelijking 1.

$$R_{SCC} = 46 + 2 \cdot \mu_{shuttle} + 2 \cdot \mu_{SIBA} \quad \text{sec} \quad (1)$$

De 46 seconden bestaan uit 4 maal (10 sec) het overbrengen van de SIBA naar/van de shuttle en 2 maal (3 sec) het neerzetten of oppakken van de pallet.  $\mu_{shuttle}$  is de tijd die voor de shuttle nodig is om naar de juiste rij te rijden en  $\mu_{SIBA}$  is de tijd die de SIBA nodig heeft om door de rij naar de juiste positie te rijden.

Bij een strategie waarbij de pallets in principe op de dichtstbijzijnde open plaats gezet worden geldt dat de verwachte single command cycle reistijd gegeven wordt door het gemiddelde van alle mogelijke reistijden. Oftewel de som van de reistijden naar iedere pallet positie gedeeld door het aantal pallet posities. Dit komt omdat bij een vol magazijn iedere pallet positie een keer bezocht gaat worden. Wanneer een pallet positie vrijkomt, wordt daar vervolgens ook weer een nieuwe pallet geplaatst. Op deze manier wordt iedere pallet positie volgens een roterend principe bezocht. Dit principe is ook beschreven in [4]. De verwachte single command cycle reistijd is op deze manier analytisch berekend en is gelijk aan 146 sec.

## 5.2. STEADY STATE

Wanneer een simulatie van 10.000 dagen gedaan wordt en met behulp van de batch means methode naar de resultaten van iedere 1000 dagen gekeken wordt, blijkt dat het systeem eigenlijk niet in een evenwichtssituatie terecht komt bij gebruik van strategie A. Wanneer deterministisch aankomsten van vrachtwagens en aantal pallets gebruikt wordt gaat dit wel goed, zoals beschreven in paragraaf 5.4.

De oorzaak van het niet ontstaan van een evenwichtssituatie is dus misschien wel de stochastiek van het systeem. Als de variantie in het aantal pallets dat gebracht en gehaald wordt erg groot is, ontstaan er snel uitschieters naar een leeg systeem of een overvol systeem. Wanneer dit gebeurt, gaat de situatie alleen maar van kwaad tot erger en zal er dus geen evenwichtssituatie ontstaan. In de volgende paragraaf (5.3) wordt onderzocht hoe de stochastiek van het systeem in elkaar zit.

## 5.3. VARIANTIE

In deze paragraaf wordt de verdeling voor het aantal aankomende pallets bepaald. Het aantal vertrekkende pallets is hetzelfde verdeeld. Zij  $T$  de stochastische variabele van het aantal pallets dat op een dag aankomt. Deze komen met vrachtwagens, waarbij het aantal vrachtwagens  $N$  op een dag Poisson verdeeld is met parameter 9. Het aantal pallets in een vrachtwagen  $B$  is binomiaal verdeeld. Er geldt dus:  $T = \sum_{i=1}^N B_i$  Waarbij,  $B \sim Bin(25, \frac{1}{2}) + 1$  en  $N \sim Pois(9)$ . Voor de verwachtingswaarde en variantie van  $T$  gelden de relaties 2 en 3.

$$E[T] = E[B] \cdot E[N] \quad (2)$$

$$var(T) = var(B) \cdot E[N] + E[B]^2 \cdot var(N) \quad (3)$$

Hierbij geldt dat  $E[B] = 13,5$ ,  $E[N] = 9$ ,  $var(B) = 6,25$  en  $var(N) = 9$ . De verwachting van  $T$  is dus  $13,5 \cdot 9 = 121,5$  en de variantie van  $T$  is  $6,25 \cdot 9 + 13,5^2 \cdot 9 = 1696,5$ . De verdeling van  $T$  is dus bekend en wordt benaderd als een normaalverdeling  $T \sim N(121,5; 1696,5)$ .

Het verschil tussen het aantal inkomende en uitgaande pallets is de som van twee normaal verdeelde stochastische variabelen en dus geldt:  $V \sim N(0, 3393)$ . Met behulp van deze verdeling kan de kans op een volledig vol of een heel leeg magazijn benaderd worden. Dit gebeurt door het verschil in aantal pallets dat het magazijn binnenkomt en verlaat, te zien als een Brownse beweging, [13]. Iedere dag is het aantal pallets in het magazijn veranderd volgens een trekking uit de normale verdeling voor de stochastische variabele  $V$ . Zij  $B(t)$  de Brownse beweging van het verschil in aantal

pallets dat het magazijn is binnen gekomen en heeft verlaten. Deze begint dus op 0 en na  $t$  dagen is  $B(t)$  de waarde die getrokken wordt uit de verdeling  $N(0, t \cdot 3393)$ , omdat dit de som is van  $t$  keer trekken van variabele  $V$ . Om de kans op overloop en leegloop van het magazijn te berekenen wordt gebruik gemaakt van stellingen 1.6.4 en 1.6.5 uit [13], zoals vergelijking 4 en 5.

$$P\left(\max_{0 \leq s \leq t} B(s) \geq x\right) = 2 \cdot P(B(t) \geq x) \quad (4)$$

$$P\left(\min_{0 \leq s \leq t} B(s) \leq y\right) = 2 \cdot P(B(t) \geq -y) \quad (5)$$

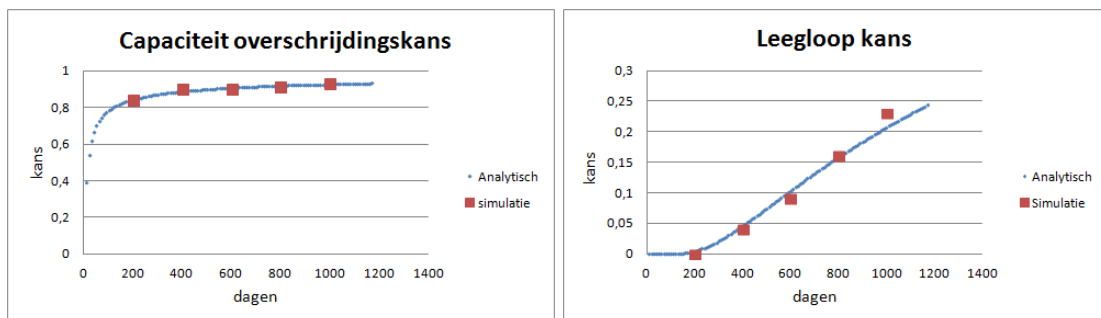
Dit geldt  $\forall x > 0$  en  $\forall y < 0$ .

Uit test experimenten is gebleken dat aankomende pallets geweigerd worden op het moment dat het magazijn een bezettingsgraad van ongeveer 95% heeft, wanneer gebruik wordt gemaakt van strategie B. Dit komt omdat er altijd twee lege rijen zijn en een half lege rij met pallets van de oudste datum. Dit zijn dus  $26 + 23 + 13 = 62$  lege plaatsen wat overeenkomt met een bezettingsgraad van 97%. Er moet echter ook rekening gehouden worden met het feit dat er in één keer 26 pallets binnen moeten komen, dus ligt de grens waarbij het magazijn onder strategie B vol raakt op 95%. Het magazijn is initieel ingericht met een bezettingsgraad van 89%. Dit betekent dat de capaciteit van het magazijn overschreden wordt wanneer er binnen  $t$  dagen 157 pallets meer zijn binnen gekomen dan dat er opgehaald zijn. Men wil dus weten wat de kans is

dat het maximum van de Brownse beweging  $B(t)$  over tijd  $t$ , groter is dan 157. Wanneer in de tijd  $t$  het minimum van de Brownse beweging lager is dan 2322 (89% van 2609), dan is het magazijn helemaal leeg geweest op een moment binnen die  $t$  dagen. De berekeningen zijn uitgevoerd met Excel, de resultaten zijn te zien in Figuren 2a en 2b. Hierbij zijn de kansen uitgedrukt als functie van het aantal dagen  $t$ .

In Figuur 2 zijn ook de fracties van de simulaties te zien waarbij het magazijn vol dan wel leeg raakt binnen  $t$  dagen. Deze komen zoals te zien is overeen met de analytische berekeningen van de kans dat het magazijn vol of leeg raakt, m.b.v. Brownse beweging. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de stochastiek van Poisson vrachtwagen aankomsten en binomiaal aantal pallets te groot is om een goede simulatie te draaien. Bij een simulatie van 1000 dagen is de kans dat het magazijn vol raakt namelijk ongeveer 92%.

Deze berekeningen zijn uitgevoerd bij de efficiëntere inrichting van het magazijn onder strategie B. Bij strategie A blijkt het magazijn al vol te zijn bij een bezettingsgraad van 90%, dus zal het magazijn dan vaker vol raken binnen een simulatie van 1000 dagen. Deze grens van 90% is gebaseerd op het feit dat bij 121 pallets per dag er 19 verschillende data in het magazijn aanwezig zijn. Iedere datum wordt in een nieuwe rij geplaatst, dus zijn er ongeveer 19 half lege rijen. Daarnaast moet ook hier nog plaats zijn voor 26 pallets die in één



(a) De kans dat de capaciteit van het magazijn overschreden is binnen  $t$  dagen. (b) De kans dat het magazijn leeg is geweest binnen  $t$  dagen.

**Figuur 2:** Blauw is analytisch m.b.v. Brownse beweging. Rood is het resultaat van de simulatie.

keer binnen kunnen komen. Er zijn bij een vol magazijn dus ongeveer  $19 * 13 + 26 = 273$  vrije plaatsen, wat overeenkomt met een bezettingsgraad van 90%.

Simulaties waarbij het magazijn steeds vol raakt, zijn niet interessant want deze situatie zal in werkelijkheid niet voorkomen. In de praktijk zal een vrachtwagen alleen pallets komen brengen als de voorraad te klein is. Een vrachtwagen zal alleen pallets komen halen als er nog genoeg in voorraad is. Dit zal meegenomen worden in de simulatie en wordt een onderdeel van de strategie. Deze vrachtwagen oproep strategie wordt beschreven in hoofdstuk 6.

#### 5.4. DETERMINISTISCHE CONTROLE SIMULATIE

Bij strategie A is de simulatie ook deterministisch uitgevoerd, om de simulatie te controleren. Hierbij is het aantal pallets in een vrachtwagen of order altijd 12 en komen er precies 9 halende en 9 brengende vrachtwagens per dag aan. De initiële inrichting van het magazijn had een bezettingsgraad van 81%. De aankomsten van de vrachtwagens waren zo gepland dat eerst een halende vrachtwagen kwam en 2 seconden later een brengende vrachtwagen. De resultaten zijn te zien in Tabel 1.

**Tabel 1:** De prestatie maten bij een deterministisch experiment.

Prestatiemaat	Waarde
$W_H$	0
$W_B$	1754 sec
$BD_H$	1764 sec
$BD_B$	1764 sec
$F_p$	19,5 dag
$F_{box,B}$	0
$N_W$	0
$N_o$	0
$T_{ov}$	3143 sec
$R_{SCC}$	147 sec
$\rho$	81%

Halende vrachtwagens hoeven nooit te wachten omdat de behandeling van een halende en vervolgens een brengende vrachtwagen minder lang duurt dan de tussenaankomsttijd van de halende vrachtwagen. De bedieningsduur van een vrachtwagen is namelijk 12 keer de gemiddelde single command cycle reistijd. Deze gemiddelde reistijd is vergelijkbaar met de analytisch uitgerekende verwachte reistijd in paragraaf 5.1. De brengende vrachtwagen moet wel wachten. Deze wachttijd wordt korter naarmate de dag vordert, omdat de aankomst steeds 2 seconden opschuift ten opzichte van de aankomst van de halende vrachtwagen. Uiteindelijk kom je op een gemiddelde wachttijd voor brengende vrachtwagens van 1754 sec, wat iets korter is dan de bedieningsduur van een halende vrachtwagen. Omdat halen en brengen elkaar steeds netjes afwisselen worden er geen pallets naar de box verplaatst,  $F_p$  is dus nul. Doordat er precies evenveel pallets binnenkomen als dat er vertrekken, blijft de bezettingsgraad constant en worden dus geen pallets of orders geweigerd. De overwerktijd is de tijd die nodig is om de laatste brengende vrachtwagen leeg te halen en een deel van de gebrachte pallets weg te zetten. Van iedere datum worden precies 108 pallets gebracht en gehaald op een dag. Dus na  $2609 \cdot 0.81/108 = 19,5$  dagen zijn alle pallets in het magazijn vernieuwd, dus de verblijftijd is inderdaad 19,5 dag. Hieruit kan dus geconcludeerd worden dat de simulatie van strategie A correct werkt.

#### 5.5. ANALYTISCHE CONTROLE VERTREKPROCES

Een extra punt waarmee gecontroleerd wordt of de simulatie van strategie A correct werkt is de gemiddelde wachttijd van een halende vrachtwagen. Hierbij wordt alleen naar het vertrek proces van pallets uit het magazijn gekeken, er zijn dus geen aankomsten van nieuwe pallets. Het leeghalen van het magazijn wordt gesimuleerd totdat het magazijn geen pallets meer bevat en vervolgens wordt de gemiddelde wachttijd van de halende vrachtwagens berekend. Dit gebeurt in het geval dat

iedere vrachtwagen deterministisch 1 pallet per keer ophaalt en er dus gemiddeld 121,5 vrachtwagens per dag komen. Het andere geval is dat er volgens een Poisson proces met gemiddelde 9, vrachtwagens aankomen waarbij het aantal pallets dat ze ophalen binomiaal verdeeld is tussen 1 en 26. De uitkomsten van de simulatie zijn te zien in de derde kolom van Tabel 2.

**Tabel 2:** De gemiddelde wachttijd in seconden van halende vrachtwagens wanneer alleen naar het vertrekproces van pallets gekeken wordt bij strategie A.

$W_H$ (sec)	Analytisch	Simulatie
1 pallet per vrachtwagen	42,1	[43,6 ; 46,6]
Binomiaal # pallets per vrachtwagen	557,5	[512,9 ; 618,4]

Om de verwachte wachttijd van de halende vrachtwagens analytisch uit te rekenen wordt het leeghalen van het magazijn gezien als een  $M/G/1$  systeem. De aankomsten van orders zijn de aankomsten van halende vrachtwagens en dit is een Poisson proces. De bedieningsduur is de tijd die de shuttle nodig heeft om de gevraagde pallets op te halen. Hiervan is alleen een gemiddelde en een variantie bekend. Er is maar 1 shuttle aanwezig in het magazijn dus is er sprake van 1 server. Vervolgens kan met de Pollaczek-Khintchine formule, zoals in vergelijking 6, de verwachte wachttijd van halende vrachtwagens uitgerekend worden.

$$E[W_H] = \frac{\rho}{2\mu(1-\rho)} \cdot (1 + (\mu\sigma)^2) \quad (6)$$

Hierbij is  $\mu^{-1}$  de gemiddelde bedieningsduur,  $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$  waarbij  $\lambda$  de aankomstintensiteit is en  $\sigma$  is de variantie van de bedieningsduur<sup>1</sup>.

Wanneer er 1 pallet door iedere vrachtwagen wordt opgevraagd is de aankomstintensiteit van orders 121,5 per dag. De bedieningsduur is de single command cycle van de shuttle die een verwachtingswaarde van 152,4

seconden en een variantie van 1358 heeft. Deze waarden zijn bepaald door voor iedere mogelijke pallet positie in de initiële inrichting de reistijd te berekenen. Vervolgens is van al deze getallen het gemiddelde en de variantie bepaald. Deze gemiddelde reistijd wijkt af van degene berekend in paragraaf 5.1, omdat daar iedere mogelijke pallet positie wordt meegenomen. In de analytische bepaling van de wachttijd worden de eerste 9 rijen niet meegenomen, omdat daar in de initiële inrichting geen pallets geplaatst zijn.

Als er een binomiaal verdeeld aantal pallets wordt opgevraagd door een halende vrachtwagen, is de bedieningsduur de som van de shuttlereistijden per pallet. Deze sommatie loopt over een stochastisch aantal pallets en dus kunnen de verwachting en variantie van de bedieningsduur bepaald worden met vergelijkingen 2 en 3. De gemiddelde bedieningsduur is dan 2057,4 seconden en de variantie is 163494. De aankomstintensiteit van orders is 9 per dag. De uitkomsten van de Pollaczek-Khintchine formule zijn te zien in de tweede kolom van Tabel 2.

Wanneer er 1 pallet per keer wordt opgevraagd is te zien dat de analytische uitkomst niet in het 95% betrouwbaarheidsinterval van de simulatie ligt. Dit kan verklaard worden doordat in de simulatie vaker pallets achteraan in een rij staan dan helemaal vooraan, want niet iedere rij is volledig gevuld bij de initiële inrichting. Hierdoor moet de SIBA vaker verder rijden en dus is de gemiddelde bedieningsduur iets langer, waardoor ook de verwachte wachttijd iets hoger ligt. In de analytische berekening is aangenomen dat wel iedere rij helemaal gevuld is en dat elke plaats in de rij dus even vaak bezocht wordt. Hierdoor is de SIBA dus gemiddeld iets minder lang onderweg, omdat hij vaker naar het begin van een rij rijdt. Analytisch valt de bedieningsduur en dus ook de wachttijd daarom iets te laag uit.

Het analytische resultaat bij een binomiaal aantal orders per vrachtwagen ligt wel in het 95% betrouwbaarheidsinterval van de simulatie. Het effect dat net beschreven is, wordt

<sup>1</sup>Dit is een andere  $\rho$  dan de bezettingsgraad van het magazijn.

opgeheven door de grotere variantie van de bedieningsduur. Er kan dus geconcludeerd worden dat de simulatie en analytische resultaten met elkaar overeenkomen en dat er geen structurele fouten in de simulatie zitten.

### 5.6. STRATEGIE B

Dankzij alle voorgaande analyses gebaseerd op strategie A, kan verondersteld worden dat de simulatie van strategie A correct werkt. Om strategie B te kunnen implementeren worden alleen de zoek algoritmes van open plaatsen en oudste pallets aangepast. Ook is de evacueer strategie extra, maar in principe veranderen deze onderdelen het functioneren van de simulatie niet. Er wordt dus vanuit gegaan dat de simulatie van strategie B ook correct werkt, maar dit is echter lastig analytisch te verifiëren. Hieronder wordt wel extra toelichting gegeven op hoe het magazijn precies is ingedeeld, wanneer gebruik wordt gemaakt van strategie B.

Hiervoor wordt eerst de kans dat er in een rij 3 data zouden komen te staan uitgerekend. Deze situatie kan ontstaan als er een rij is met 1 pallet van datum 1, vervolgens minder dan ( $lengte - 2$ ) pallets van datum 2 en dan nog een pallet van datum 3. Voor een rij met lengte 26 geldt dus dat deze situatie voorkomt op het moment dat er minder dan 24 pallets op een dag aankomen. Voor een rij met lengte 23 zouden er minder dan 21 pallets op een dag moeten aankomen. De kans dat er een rij met drie verschillende data voor zou kunnen komen is dus de kans dat er minder dan 24 pallets op

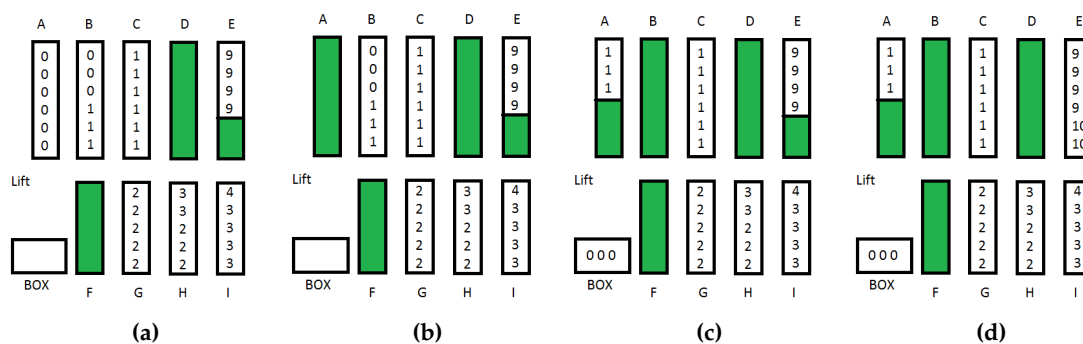
een dag aankomen. Het aantal pallets dat op een dag aankomt is  $T$  en heeft bij benadering een normale verdeling  $N(121,5; 1696,5)$ , zoals in paragraaf 5.3 omschreven. De kans dat er dus minder dan 24 pallets op een dag komen is:

$$\begin{aligned} P(T \leq 24) &= P\left(Z \leq \frac{24 - 121,5}{\sqrt{1696,5}}\right) \\ &= P(Z \leq -2,37) \\ &= 0,0090. \end{aligned}$$

Hierbij is  $Z$  standaard normaal verdeeld. Deze kans is dus zeer klein, maar in de simulatie is toch geprogrammeerd dat de situatie dat er meer dan 2 verschillende data in een rij staan, niet plaats zal vinden.

Door de open plaats strategie geldt dus voor iedere rij van het magazijn dat deze of alleen pallets met dezelfde datum bevat of twee soorten pallets met opeenvolgende data, waarbij de nieuwere datum vooraan staat. Daarnaast is er altijd minstens 1 lege rij van lengte 26 en minstens 1 lege rij van lengte 23. In Figuur 3a is een voorbeeld van een situatie te zien.

Bij de ophaal strategie worden eerst alle pallets met de oudste datum opgehaald die direct beschikbaar zijn. Deze staan dus allemaal in rijen die alleen maar pallets met die oudste datum bevatten. Dit is dus rij A in het voorbeeld en na het ophalen van deze pallets ontstaat de situatie in Figuur 3b. Vervolgens moeten de pallets met de oudste datum opgehaald worden die achter een nieuwere datum staan,



**Figuur 3:** De situaties van het magazijn die bij strategie B kunnen voorkomen. De lege plaatsen zijn groen gekleurd.

rij B. De rij waar deze pallets staan, wordt geëvacueerd door de pallets met nieuwere datum naar de lege rij met dezelfde lengte te verplaatsen en de pallets met de oudste datum worden alvast naar de box verplaatst. Deze worden namelijk binnenkort opgehaald. Nu is er dus direct een nieuwe lege rij ontstaan in het magazijn. Op dit moment is de oudste datum dus niet meer aanwezig in het magazijn. Deze situatie is te zien in Figuur 3c.

De nieuwe oudste datum is de datum van de pallets die net verplaatst zijn naar de lege rij, omdat de data van pallets in een rij altijd opeenvolgend zijn. Het proces van ophalen kan nu weer verder gaan met eerst alle pallets die direct beschikbaar zijn.

Mocht er in een situatie een nieuwe pallet aankomen, dan wordt deze niet op de eerste open plaats gezet, maar wordt eerst de half lege rij met de nieuwste datum in het magazijn verder aangevuld. In het voorbeeld wordt een nieuwe pallet met datum 10 in rij E gezet en niet in rij A, F of B. De situatie na een aankomst van pallets is te zien in Figuur 3d. Op het moment dat de rij helemaal is aangevuld, wordt een nieuwe rij begonnen. Deze nieuwe rij hoeft niet direct naast de vorige rij te liggen. Een nieuwe rij kan echter alleen begonnen worden als er meerdere compleet lege rijen zijn met dezelfde lengte. In het voorbeeld van figuur 3d kunnen in rij B dus nieuwe pallets geplaatst worden. Wanneer rij B dan ook vol is, is er nog maar één lege rij van lengte 23 en één lege rij van lengte 26, op dat moment worden nieuwe pallets tijdelijk in de box geplaatst.

## 6. TOEVOEGING STRATEGIE

Uit de analyse van het systeem en de strategie in paragraaf 5.3 blijkt, dat de aannames voor de aankomst van pallets te veel stochastiek met zich mee brengen. In de definitieve simulatie is daarom een extra strategie toegepast op het oproepen van vrachtwagens om het systeem beter te kunnen controleren. Deze vrachtwagen oproep strategie wordt hieronder beschreven.

Om te voorkomen dat het magazijn daadwerkelijk vol of leeg raakt wordt een vrachtwagen

oproep strategie geïntroduceerd. Deze is bij zowel strategie A als strategie B hetzelfde op de grenswaardes na. In de praktijk zal een vrachtwagen geen pallets brengen als het magazijn bijna vol zit en er worden alleen nieuwe pallets gebracht als de voorraad te laag is. Deze grenzen worden respectievelijk bovengrens  $Q\%$  en ondergrens  $q\%$  genoemd. Gebaseerd op deze aannames wordt de intensiteit van het aankomstproces van brengende vrachtwagens afhankelijk van de bezettingsgraad van het magazijn gemaakt. Hierbij is het doel om de gemiddelde bezettingsgraad van het magazijn zo hoog mogelijk te houden.

Het magazijn dreigt vol te raken bij een bezettingsgraad van  $Q\%$ , afhankelijk van de strategie. Om nu de vrachtwagen oproep strategie te kunnen implementeren wordt aan het eind van iedere dag de bezettingsgraad van het magazijn berekend. Wanneer deze groter is dan  $Q\%$  staan er genoeg pallets in het magazijn en worden er voor de volgende dag minder aankomsten van brengende vrachtwagens gepland dan de gebruikelijke 9 per dag. Als de bezettingsgraad lager is dan  $q\%$  worden er de volgende dag meer aankomsten van brengende vrachtwagens gepland of minder halende vrachtwagens. De aankomstintensiteit van brengende vrachtwagens wordt genoteerd met  $\mu_B$ , het verwachte aantal vrachtwagens per dag. Voor halende vrachtwagens wordt de aankomstintensiteit genoteerd met  $\mu_H$ . Bij een bezettingsgraad tussen de percentages  $q$  en  $Q$  in blijven de beide aankomst processen zoals ze waren, dus voor zowel halende als brengende vrachtwagens gemiddeld 9 per dag.

Het aankomstproces van vrachtwagens blijft altijd Poisson verdeeld, omdat er niet met zekerheid gezegd kan worden hoeveel vrachtwagens er aan komen en al helemaal niet wanneer ze precies aankomen. Wanneer dit wel bekend zou zijn, zou ook het aantal pallets in een vrachtwagen bekend moeten zijn en zou het hele systeem dus deterministisch worden. Dit zou alles vereenvoudigen. Het idee is dat er vanuit het magazijn dus wordt doorgegeven dat de aanvoer van pallets verminderd moet worden, maar dat vanuit de productie fabriek



niet direct precies het gevraagde aantal pallets geleverd kan worden. Een productie proces reageert namelijk vrij langzaam en dus blijft de aankomst van het aantal pallets onzeker, waardoor het gemodelleerd kan worden als een Poisson proces.

Uit test simulaties is al gebleken dat er pallets geweigerd worden op het moment dat de bezettingsgraad ongeveer 90% is bij strategie A en ongeveer 95% bij strategie B. Dit is eerder genoemd in paragraaf 5.3. Het aantal pallets dat op een dag binnenkomt is bij benadering normaal verdeeld,  $T \sim N(121, 5; 1696, 5)$ . Dit betekent dat in 95 van de 100 gevallen tussen de 39 en 203 pallets per dag aankomen. In het ergste geval, wanneer eerst alle pallets van een dag gebracht worden, moet de gemiddelde bezettingsgraad dus zo zijn dat er op dat moment nog 203 pallets bij kunnen. 203 van de 2609 plaatsen komt overeen met ongeveer 8%. Dus voor strategie A zou een gemiddelde bezettingsgraad van 82% geschikt zijn en voor strategie B 87%. Een juiste vrachtwagen oproep strategie bestaat uit het bepalen van de nieuwe aankomstintensiteiten bij de grenzen  $q$  en  $Q$  en het bepalen van de ondergrens  $q$ . In hoofdstuk 7 wordt beschreven hoe de simulatie van verschillende experimenten in zijn werk gaat.

## 7. SIMULATIE

Met het simulatie model worden verschillende experimenten uitgevoerd. Een experiment bestaat uit 30 replicaties van 1000 dagen achter elkaar. Hierdoor kunnen 95%-betrouwbaarheidsintervallen van de prestatie-maten berekend worden. Ook wordt de relatieve precisie uitgerekend, waarbij het wenselijk is dat deze lager is dan 10%. Om er voor te zorgen dat alleen de gegevens uit de evenwichtssituatie mee worden genomen in de resultaten, worden de eerste 50 dagen van de simulatie verwijderd. Dit wordt gedaan omdat dan met zekerheid gesteld kan worden dat alle pallets die tot de initiële inrichting behoorde uit het magazijn zijn verdwenen. Het magazijn heeft na 50 dagen dus een inrichting die

door het systeem zelf ontstaan is en niet van tevoren bedacht is.

### 7.1. DOEL

Het doel van de simulaties is dus om bij zowel strategie A als B een geschikte vrachtwagens strategie te vinden. Hierbij is het wenselijk om de gemiddelde bezettingsgraad zo hoog mogelijk te houden, met als richtpunt 82% bij strategie A en 87% bij strategie B, zoals beschreven in hoofdstuk 6. Daarnaast wordt als eis gesteld dat maximaal 1% van de inkomende pallets geweigerd wordt. Het zoeken naar de juiste vrachtwagen oproep strategie gebeurt in paragraaf 8.1, waarbij tijdens de experimenten voornamelijk strategie A gebruikt wordt, om vervolgens de vrachtwagen oproep strategie te vertalen naar strategie B.

Als deze vrachtwagen oproep strategie bepaald is zal daarna de doorvoer van het systeem gemaximaliseerd worden. Dit gebeurt in paragraaf 8.2. Hierbij wordt gekeken of het systeem onder beide strategieën misschien wel meer dan 121 aankomende en vertrekkende pallets per dag aan kan. Er wordt gekeken of de wacht- en behandeltijden van de vrachtwagens niet te hoog worden.

Tot slot is het de bedoeling om beide strategieën te vergelijken en de voor- en nadelen van ieder strategie te benoemen. Deze resultaten zijn te zien in paragraaf 8.3.

## 8. RESULTATEN

In dit hoofdstuk wordt een overzicht van de resultaten van verschillende experimenten gegeven. De waardes van de prestatie-maten worden uitgedrukt in 95% betrouwbaarheidsintervallen (BHI). Al deze resultaten zijn verkregen met de simulatie programma's die beschreven zijn in bijlage C. Daarnaast wordt tussen de resultaten door commentaar geleverd op de resultaten om een volgend experiment te kunnen plannen, waarbij de experimenten in drie groepen zijn verdeeld zoals beschreven in paragraaf 7.1. Andere opvallende resultaten worden besproken in paragraaf 8.4. De dis-

cussie in hoofdstuk 9 zal meer gaan over het proces van het onderzoek dan over de resultaten. Uiteindelijk zal er in hoofdstuk 10 een conclusie getrokken worden uit de resultaten.

### 8.1. VRACHTWAGEN OPROEP STRATEGIE

In eerste instantie wordt de ondergrens  $q\%$  gekozen op 10% waarbij op dat moment geen halende vrachtwagens voor de volgende dag gepland worden. De bovengrens  $Q\%$  is voor strategie A 90% en voor strategie B 95%, zoals eerder genoemd. Bij deze bovengrens wordt de aankomstintensiteit van de brengende vrachtwagens de volgende dag op 7 per dag gesteld. De normale aankomstintensiteit van de vrachtwagens is 9 per dag. De resultaten van de simulatie van strategie A bij deze vrachtwagen oproep strategie zijn te zien in Tabel 3.

**Tabel 3:** De prestatie-maten bij strategie A, grens  $q = 10\%$  met  $\mu_H = 0$  en  $Q = 90\%$  met  $\mu_B = 7$ .

Prestatiemaat	95% BHI
$W_H$ (min)	[11,9 ; 13,0]
$W_B$ (min)	[29,2 ; 33,2]
$BD_H$ (min)	[28,3 ; 29,4]
$BD_B$ (min)	[28,1 ; 29,2]
$F_P$ (dagen)	[12,8 ; 14,3]
$F_{box,B}$ (uren)	[18,4 ; 24,4]
$N_w$ (%)	[0,9 ; 2,1]
$N_o$ (%)	[0 ; 0]
$T_{ow}$ (min)	[41,1 ; 45,6]
$R_{SCC}$ (sec)	[126 ; 131]
$\rho$ (%)	[58,8 ; 65,6]

Uit deze resultaten blijkt dat de bezettingsgraad vrij laag uitvalt, dit is niet wenselijk. Dus is besloten om de vrachtwagen oproep strategie aan te passen zodat de bezettingsgraad hoger wordt. De ondergrens  $q\%$  wordt hoger gelegd en de aankomstintensiteit van de brengende vrachtwagens wordt gevarieerd, in plaats van die van de halende vrachtwagens. De aankomstintensiteit  $\mu_H$  blijft nu dus altijd gelijk aan 9 per dag. In praktijk is dit ook logisch, omdat de vraag naar producten niet ineens aangepast kan worden. Terwijl de aan-

voer van producten wel aangepast kan worden, door er minder vanuit de productie fabriek naar de opslag te sturen.

Bij strategie A zijn vervolgens drie simulaties uitgevoerd om de ondergrens  $q$  te bepalen. In Tabel 4 is de uitkomst te zien bij grens  $q = 60\%$ , in Tabel 5 voor  $q = 70\%$  en in Tabel 6 voor  $q = 80\%$ . Hierbij is de nieuwe  $\mu_B$  bij de ondergrens  $q$  steeds gekozen op 12 per dag.

**Tabel 4:** De prestatie-maten bij strategie A, grens  $q = 60\%$  met  $\mu_B = 12$  en  $Q = 90\%$  met  $\mu_B = 7$ .

Prestatiemaat	95% BHI
$W_H$ (min)	[ 14,4 ; 14,8 ]
$W_B$ (min)	[ 37,7 ; 40,0 ]
$BD_H$ (min)	[ 30,8 ; 31,1 ]
$BD_B$ (min)	[ 30,6 ; 30,9 ]
$F_P$ (dagen)	[ 16 ; 16,6 ]
$F_{box,B}$ (uren)	[ 18,3 ; 22,5 ]
$N_w$ (%)	[ 1,1 ; 1,8 ]
$N_o$ (%)	[ 0 ; 0 ]
$T_{ow}$ (min)	[ 49,0 ; 52,3 ]
$R_{SCC}$ (sec)	[ 137 ; 138 ]
$\rho$ (%)	[ 74,4 ; 76,7 ]

**Tabel 5:** De prestatie-maten bij strategie A, grens  $q = 70\%$  met  $\mu_B = 12$  en  $Q = 90\%$  met  $\mu_B = 7$ .

Prestatiemaat	95% BHI
$W_H$ (min)	[ 15,3 ; 15,6 ]
$W_B$ (min)	[ 42,0 ; 44,0 ]
$BD_H$ (min)	[ 31,6 ; 31,8 ]
$BD_B$ (min)	[ 31,4 ; 31,5 ]
$F_P$ (dagen)	[ 17,1 ; 17,5 ]
$F_{box,B}$ (uren)	[ 19,1 ; 21,4 ]
$N_w$ (%)	[ 1,5 ; 2,3 ]
$N_o$ (%)	[ 0 ; 0 ]
$T_{ow}$ (min)	[ 54,8 ; 57,4 ]
$R_{SCC}$ (sec)	[ 140 ; 141 ]
$\rho$ (%)	[ 79,7 ; 81,0 ]

Uit Tabel 4 en 5 blijkt dat de bezettingsgraad hoger ligt wanneer er eerder (hogere  $q$ ) meer brengende vrachtwagens opgeroepen worden. Hierdoor nemen alle prestatie-maten iets toe. Deze toenames zijn echter niet zo groot, dat de grens van 70% voor meer brengende vrachtwagens oproepen te hoog is.

**Tabel 6:** De prestatie-maten bij strategie A, grens  $q = 80\%$  met  $\mu_B = 12$  en  $Q = 90\%$  met  $\mu_B = 7$ .

Prestatiemaat	95% BHI
$W_H$ (min)	[ 16,0 ; 16,4 ]
$W_B$ (min)	[ 48,7 ; 50,5 ]
$BD_H$ (min)	[ 32,4 ; 32,4 ]
$BD_B$ (min)	[ 31,9 ; 32,0 ]
$F_P$ (dagen)	[ 18,3 ; 18,5 ]
$F_{box,B}$ (uren)	[ 20,1 ; 22,5 ]
$N_w$ (%)	[ 3,3 ; 4,5 ]
$N_o$ (%)	[ 0 ; 0 ]
$T_{ow}$ (min)	[ 62,2 ; 64,1 ]
$R_{SCC}$ (sec)	[ 144 ; 144 ]
$\rho$ (%)	[ 85,0 ; 85,4 ]

De grens van 80% is wel te hoog, want er wordt meer dan 3% van de pallets geweigerd, zoals te zien in Tabel 6. Dit is niet de bedoeling. Dus hieruit kan geconcludeerd worden dat de grens van 70% geschikt is voor strategie A. De bezettingsgraad zal bij strategie A dus tussen de 70% en 90% schommelen, wat neer komt op een gemiddelde bezettingsgraad van ongeveer 80%. Dit was ook het doel zoals beschreven in paragraaf 7.1. Nu moeten alleen nog de nieuwe aankomstintensiteiten bij de grenzen bepaald worden bij strategie A, want er worden nog steeds te veel pallets geweigerd. Er is vervolgens een simulatie met  $\mu_B = 6$  bij  $Q = 90\%$  uitgevoerd. De resultaten hiervan zijn te zien in Tabel 7.

**Tabel 7:** De prestatie-maten bij strategie A, grens  $q = 70\%$  met  $\mu_B = 12$  en  $Q = 90\%$  met  $\mu_B = 6$ .

Prestatiemaat	95% BHI
$W_H$ (min)	[ 15,1 ; 15,4 ]
$W_B$ (min)	[ 40,2 ; 41,6 ]
$BD_H$ (min)	[ 31,6 ; 31,7 ]
$BD_B$ (min)	[ 31,4 ; 31,6 ]
$F_P$ (dagen)	[ 17,1 ; 17,5 ]
$F_{box,B}$ (uren)	[ 16,5 ; 18,8 ]
$N_w$ (%)	[ 0,6 ; 1,0 ]
$N_o$ (%)	[ 0 ; 0 ]
$T_{ow}$ (min)	[ 52,4 ; 54,5 ]
$R_{SCC}$ (sec)	[ 140 ; 141 ]
$\rho$ (%)	[ 79,6 ; 80,8 ]

Wanneer er bij strategie A minder bren-gende vrachtwagens opgeroepen worden bij dezelfde grens  $Q$ , zoals te zien in Tabel 7, veranderen de prestatie-maten voor wacht- en behandeltijd niet significant ten opzichte van Tabel 5. Wel daalt het aantal geweigerde pallets en de verblijftijd in de box. Ook de bezettings-grad blijft ongeveer hetzelfde. Het is dus voordeliger om bij strategie A bij de grens  $Q$  een nieuwe aankomstintensiteit van 6 vrachtwagens per dag te plannen, in plaats van 7. Het aantal geweigerde pallets daalt dan tot onder de gewenste 1%.

Voor strategie A is nu dus de vrachtwagen oproep strategieën bij de bovengrens bepaald. Ook de ondergrens  $q$  ligt al vast. Bij die ondergrens  $q$  is tot nu toe steeds een nieuwe aankomstintensiteit van  $\mu_B = 12$  gebruikt. In Tabel 8 zijn de resultaten voor strategie A te zien met een nieuwe aankomstintensiteit van  $\mu_B = 14$  bij de ondergrens  $q$ .

**Tabel 8:** De prestatie-maten bij strategie A, grens  $q = 70\%$  met  $\mu_B = 14$  en  $Q = 90\%$  met  $\mu_B = 6$ .

Prestatiemaat	95% BHI
$W_H$ (min)	[ 15,3 ; 15,6 ]
$W_B$ (min)	[ 41,6 ; 42,8 ]
$BD_H$ (min)	[ 31,7 ; 31,8 ]
$BD_B$ (min)	[ 31,5 ; 31,7 ]
$F_P$ (dagen)	[ 17,2 ; 17,5 ]
$F_{box,B}$ (uren)	[ 17,7 ; 19,4 ]
$N_w$ (%)	[ 0,7 ; 1,1 ]
$N_o$ (%)	[ 0 ; 0 ]
$T_{ow}$ (min)	[ 53,3 ; 55,1 ]
$R_{SCC}$ (sec)	[ 140 ; 141 ]
$\rho$ (%)	[ 80,2 ; 81,2 ]

Voor strategie A worden nu Tabellen 7 en 8 vergeleken om de nieuwe aankomstinten-siteit bij de ondergrens  $q = 70\%$  te bepalen. Te zien is dat de wacht- en bedieningstijden iets toenemen, net als de bezettingsgraad. Het aantal geweigerde pallets stijgt echter ook net boven de 1%, wanneer  $\mu_B = 14$  gebruikt wordt. Er kan geconcludeerd worden dat het verschil tussen  $\mu_B = 12$  en  $\mu_B = 14$  bij de ondergrens  $q = 70\%$  niet significant is. Het maakt dus niet

uit hoe de vrachtwagen oproep strategie op dit punt gekozen wordt bij strategie A.

Na al deze experimenten is de optimale vrachtwagen oproep strategieën bij een doorvoer van 9 brengende vrachtwagens per dag en gebruik van strategie A bekend. De ondergrens wordt gesteld op  $q = 70\%$  met  $\mu_B = 12$  en de bovengrens op  $Q = 90\%$  met  $\mu_B=6$ . Om deze vrachtwagen oproep strategie te vertalen naar strategie B moet gekeken worden naar het verschil in aankomstintensiteiten. Bij de ondergrens komen dus 3 brengende vrachtwagens meer dan halende vrachtwagens aan, waardoor de bezettingsgraad van het magazijn zal toenemen. Bij de bovengrens komen er juist 3 brengende vrachtwagens minder dan halende vrachtwagens en zal de bezettingsgraad afnemen. Dit verschil wordt als de vrachtwagen oproep strategie beschouwd, waardoor nu ook de vrachtwagen oproep strategie bij een andere doorvoer bekend is. Bij een doorvoer van  $\mu_B$  geldt dat er bij de ondergrens  $\mu_B + 3$  brengende vrachtwagens komen en bij de bovengrens  $\mu_B - 3$ .

Voor de vrachtwagen oproep strategie bij gebruik van strategie B in het magazijn worden alleen de grenzen  $Q\%$  en  $q\%$  aangepast. Bij strategie B is al bekend dat de bovengrens op  $Q = 95\%$  ligt, omdat deze strategie een hogere bezettingsgraad aankan. Dit is 5% hoger dan de bovengrens bij strategie A, dus wordt de ondergrens voor strategie B op 75% gesteld. Hierdoor is de verwachte gemiddelde bezettingsgraad bij strategie B 85%. De resultaten van de simulatie van strategie B met de vrachtwagen oproep strategie overgenomen van strategie A, zijn te zien in Tabel 9. Hierbij geldt  $q = 75\%$  met  $\mu_B = 12$  en  $Q = 95\%$  met  $\mu_B=6$ .

**Tabel 9:** De prestatie-maten bij strategie B, grens  $q = 75\%$  met  $\mu_B = 12$  en  $Q = 95\%$  met  $\mu_B = 6$ .

Prestatiemaat	95% BHI
$W_H$ (min)	[ 19,7 ; 20,0 ]
$W_B$ (min)	[ 51,6 ; 52,6 ]
$BD_H$ (min)	[ 38,2 ; 38,4 ]
$BD_B$ (min)	[ 31,2 ; 31,4 ]
$F_P$ (dagen)	[ 18,1 ; 18,4 ]
$F_{box,B}$ (uren)	[ 14,8 ; 17,2 ]
$F_{box,H}$ (min)	[ 26,3 ; 27,7 ]
$N_w$ (%)	[ 0,1 ; 0,3 ]
$N_o$ (%)	[ 0 ; 0 ]
$T_{ow}$ (min)	[ 63,0 ; 64,4 ]
$R_{SCC}$ (sec)	[ 139 ; 140 ]
$N_e$ (#)	[ 12,4 ; 12,5 ]
$T_e$ (min)	[ 67,5 ; 68,0 ]
$\rho$ (%)	[ 84,5 ; 85,4 ]

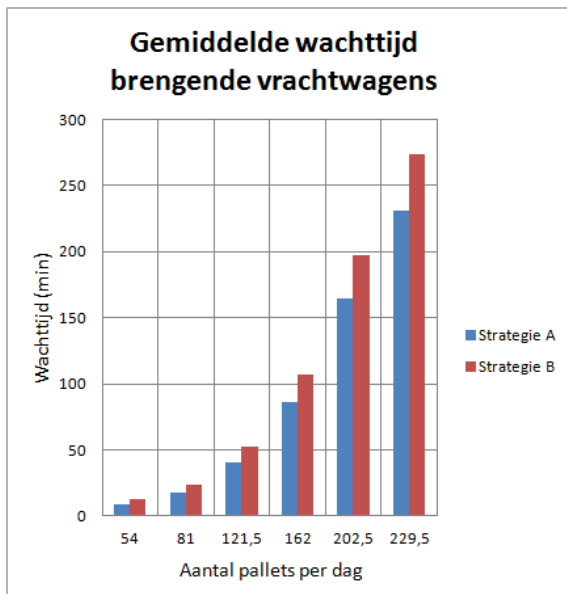
Hierin is te zien dat het aantal geweigerde pallets voldoet aan de eis van maximaal 1%. Ook de gemiddelde bezettingsgraad voldoet aan de verwachting van ongeveer 85%. Dit bevestigt dat de vrachtwagen oproep strategie zowel voor strategie A als strategie B gebruikt kan worden, waarbij de grenzen  $Q$  en  $q$  echter wel verschillen voor beide strategieën. Voor strategie A geldt dus  $Q = 90\%$  en  $q = 70\%$ , voor strategie B geldt  $Q = 95\%$  en  $q = 75\%$ . In beide gevallen wordt de nieuwe aankomstintensiteit 3 hoger dan de doorvoer bij de ondergrens en 3 lager dan de doorvoer bij de bovengrens.

## 8.2. MAXIMALE DOORVOER

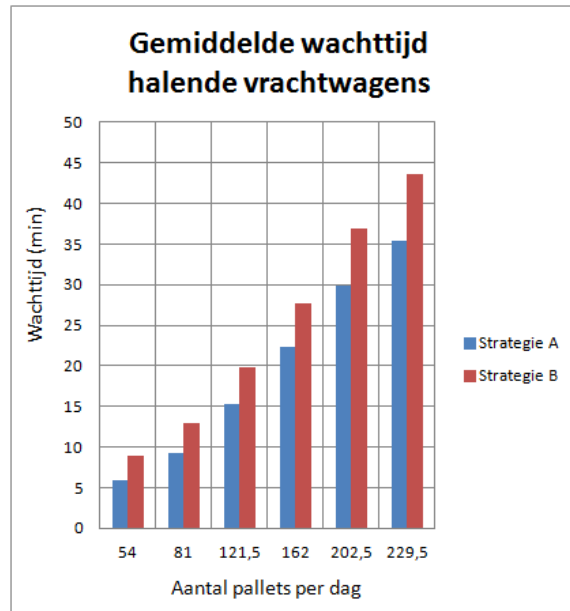
Nu wordt er bij deze vaste vrachtwagen oproep strategie voor beide strategieën (A en B) gekeken of de doorvoer groter kan zijn dan 121 inkomende pallets en 121 uitgaande pallets per dag. Hierbij wordt het aantal vrachtwagens dat op een dag komt gevarieerd, waarbij normaal gesproken evenveel brengende als halende vrachtwagens op een dag aankomen. Als de doorvoer dus gekozen wordt op 9 vrachtwagens per dag, zoals tot nu toe, betekent dit dat er per dag gemiddeld 9 halende en 9 brengende vrachtwagens komen. Dit komt overeen met  $13,5 \cdot 9 = 121,5$  pallets per dag die binnen

komen en gemiddeld 121,5 pallets die opgevraagd worden.

In totaal zijn er voor zowel strategie A als B 6 experimenten uitgevoerd bij verschillende doorvoer, namelijk  $\mu_B = 4, 6, 9, 12, 15$  en  $17$ . De waarden van alle prestatiepunten staan in de tabellen in bijlage D. Het criterium waar voornamelijk naar gekeken wordt bij het maximaliseren van de doorvoer is de wachttijd van de vrachtwagens. Deze neemt toe naarmate er meer pallets per dag behandeld worden, maar vrachtwagens mogen niet te lang wachten. In Figuur 4 en 5 zijn de wachttijden van de brengende en respectievelijk halende vrachtwagens te zien als functie van het aantal pallets dat binnenkomt en vertrekt. De wachttijd van brengende vrachtwagens is langer, omdat halende vrachtwagens prioriteit hebben. Ook het leeghalen van de box heeft prioriteit boven brengende vrachtwagens. In praktijk zullen brengende vrachtwagens echter niet hoeven te wachten, zij laden de pallets uit en kunnen weer vertrekken. Daarna kunnen de pallets het magazijn in gebracht worden. De wachttijd van brengende vrachtwagens is dus eigenlijk de wachttijd van de gebrachte pallets.



**Figuur 4:** De gemiddelde wachttijd van brengende vrachtwagens bij verschillende doorvoer voor strategie A en B.



**Figuur 5:** De gemiddelde wachttijd van halende vrachtwagens bij verschillende doorvoer voor strategie A en B.

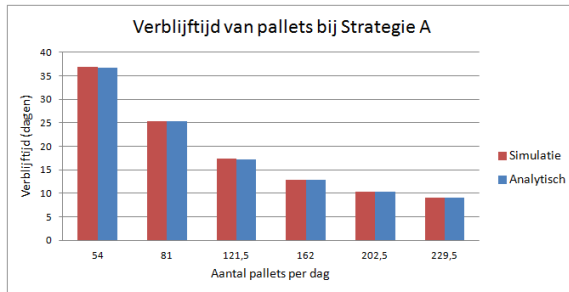
Verder is in de tabellen in bijlage D te zien dat bij een hogere doorvoer de overwerk-tijd langer is. Deze is echter nooit langer dan 5 uur, dus dit levert geen problemen op. De nacht duurt immers 9 uur en er wordt geen herschikking van pallets in de nacht uitgevoerd. Daarnaast moet genoemd worden dat het aantal geweigerde pallets meestal beneden de 1% blijft, dankzij de vrachtwagen oproep strategie.

Vervolgens is het verband tussen de bezettingsgraad, doorvoer en verblijftijd van de pallets in het magazijn afgeleid. Dit verband wordt weergegeven in vergelijking 7, waarbij  $\mu_B$  de doorvoer is.

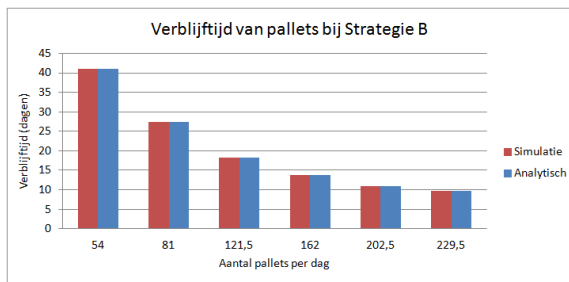
$$F_P = \frac{\rho}{100} \cdot \frac{2609}{\mu_B \cdot 13,5} \quad (7)$$

De waarden voor de verblijftijd van de pallets in het magazijn die de simulatie als resultaat geeft zijn in rood weergegeven in Figuren 6 en 7 voor strategie A respectievelijk strategie B. Daarnaast is de verblijftijd voor zowel strategie A als B uitgerekend met behulp van vergelijking 7 en de gemiddelde bezettingsgraad

die de simulatie gaf. Deze uitkomsten zijn in blauw weergegeven in Figuren 6 en 7.



**Figuur 6:** De verblijftijd van de pallets in het magazijn bij verschillende doorvoer bij strategie A. Zowel analytisch als met de simulatie berekend.



**Figuur 7:** De verblijftijd van de pallets in het magazijn bij verschillende doorvoer, bij strategie B. Zowel analytisch als met de simulatie berekend.

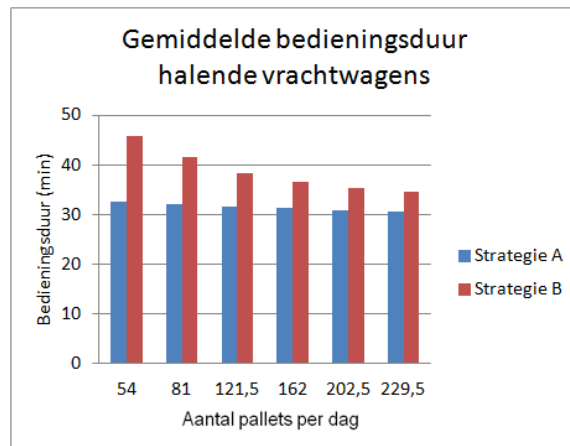
Zoals te zien is, verschillende de uitkomsten van simulatie en analyse eigenlijk niet. Dit is dus een extra bevestiging dat de simulatie correct werkt. Verder is te zien dat bij strategie B de verblijftijd langer is dat bij strategie A. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat het magazijn bij strategie B een hogere bezettingsgraad heeft, waardoor er meer pallets in het magazijn staan en het dus ook langer duurt voordat al deze pallets vervangen zijn door nieuwe pallets.

Tot slot moet nog genoemd worden dat de verblijftijd van pallets die in de box geplaatst zijn om binnenkort opgehaald te worden, afneemt naarmate de doorvoer groter is. Dit komt omdat bij een grotere doorvoer er meer

vrachtwagens aankomen op een dag en dat de tijd die tussen twee halende vrachtwagens zit dus korter is.

### 8.3. VERGELIJKING STRATEGIEËN

Om de strategieën A en B te vergelijken, worden de uitkomsten in naast elkaar staande tabellen in bijlage D met elkaar vergeleken. Dit zijn namelijk experimenten die gelijk zijn, afgezien van de strategie. De bedieningsduur voor halende vrachtwagens is langer bij strategie B. Dit komt omdat er af en toe geëvacueerd moet worden, waardoor de shuttle langer bezig is. De gemiddelde bedieningstijden voor strategie A en B staan in Figuur 8. Hierin is te zien dat bij een hogere doorvoer de bedieningsduur voor halende vrachtwagens afneemt bij strategie B. Dit komt omdat bij een hogere doorvoer er meer pallets van dezelfde dag zijn en er dus ook meer rijen zijn met 1 soort pallet. Hierdoor hoeven in verhouding minder vrachtwagens te wachten op een evacuatie.

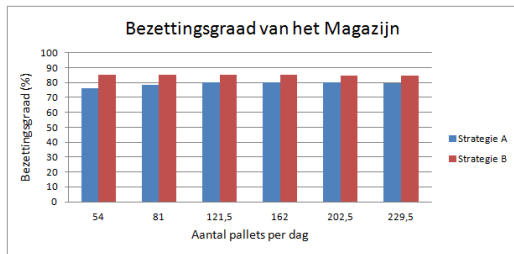


**Figuur 8:** De behandeltijd van halende vrachtwagens bij verschillende doorvoer. Voor zowel strategie A als strategie B.

De prestatieparameters  $W_H$ ,  $W_B$  en  $T_{ow}$  zijn hoger bij strategie B. Het evacueren neemt namelijk meer tijd in beslag (ongeveer een uur per keer) en dus moet iedere vrachtwagen langer wachten. Dus is er ook meer tijd nodig om alles af te handelen aan het eind van

de dag. De prestatie-maten  $BD_B$  en  $R_{SCC}$  zijn ongeveer hetzelfde bij strategie A en B, omdat deze namelijk geen verband houden met het wel of niet evacueren.

Het grootste verschil tussen de twee strategieën is echter de bezettingsgraad. Zoals in Figuur 9 te zien is, is het magazijn bij strategie B efficiënter gevuld dan bij strategie A bij hetzelfde experiment. Dit was van te voren ook de verwachting, omdat bij strategie B niet iedere soort pallet in een nieuwe rij geplaatst hoeft te worden. Door de hogere bezettingsgraad is ook de verblijftijd van de pallets bij strategie B langer dan bij strategie A.



**Figuur 9:** De bezettingsgraad van het magazijn bij verschillende experimenten.

#### 8.4. OVERIGE RESULTATEN

Het aantal orders dat geweigerd wordt ( $N_o$ ) bedraagt altijd 0. Dit is dankzij de vrachtwagen oproep strategie waardoor het magazijn nooit leeg raakt.

Uit de simulaties komen gemiddelde reistijden van 135 tot 145 seconden. Hoe hoger de doorvoer hoe lager de gemiddelde reistijd bij een simulatie. Dit effect is voornamelijk te zien bij strategie A. Dit kan verklaard worden doordat bij een hogere doorvoer er meer pallets op een dag behandeld worden. Onder strategie A geldt dus dat er bij een hogere doorvoer meer volledig gevulde rijen zijn dan bij een lage doorvoer, namelijk meer pallets die dezelfde datum hebben. Hierdoor worden er door de SIBA dus meer plaatsen bezocht die aan het begin van de rij (aan het gangpad) zijn. Deze plaatsen hebben een kortere single command cycle reistijd, waardoor de gemiddelde reistijd van de shuttle dus iets afneemt. Dit

fenomeen treedt duidelijker op bij strategie A dan B omdat bij strategie B alle plaatsen in een rij gebruikt worden, dus ook met verschillende data in een rij.

In paragraaf 5.1 is de verwachte reistijd van de shuttle analytisch berekend, deze was 146 sec. Deze is dus iets te hoog uitgevallen en dit komt omdat bij deze analytische berekening werd aangenomen dat iedere plaats even vaak bezocht werd. In de simulatie worden pallets echter in de dichtstbijzijnde rij geplaatst waardoor de rijen achter in het magazijn minder vaak gebruikt worden. Deze rijen hebben de langste reistijd, wanneer deze minder vaak mee tellen valt de gemiddelde reistijd van de shuttle iets lager uit dan de verwachte 146 sec.

De verblijftijd van pallets in de box die gebracht zijn ( $F_{box,B}$ ), maar niet direct in het magazijn geplaatst kunnen worden is vrij groot, namelijk meer dan 17 uur. Dit komt omdat dit de pallets zijn die ook niet aan het eind van de dag in het magazijn passen. Ze verblijven dus de hele nacht in de box, wat in ieder geval 9 uur duurt. Vervolgens moeten deze pallets nog wachten tot er de volgende dag plaats is zodat ze naar het magazijn gebracht kunnen worden. De exacte waarde van deze verblijftijd verschilt wel per simulatie en dus per doorvoer. Er is echter geen duidelijk verband en dus ook geen oorzaak voor te ontdekken. Wel geldt dat de relatieve precisie van het betrouwbaarheidsinterval behorend bij deze prestatie-maat groter is dan de andere relatieve precisies. Dit zou kunnen betekenen dat de verblijftijd in de box van gebrachte pallets gewoon niet altijd gelijk is, ook niet wanneer het systeem zich in evenwichtstoestand bevindt.

Bij strategie B is berekend hoeveel pallets er gemiddeld geëvacueerd moeten worden. De waarde van de prestatie-maat  $N_e$  blijkt bij iedere simulatie ongeveer 12,3 te zijn. In een rij van lengte 26 kunnen 1 tot en met 25 pallets geëvacueerd worden, in een rij van lengte 23, 1 tot en met 22. Onder de veronderstelling dat ieder aantal pallets dat geëvacueerd kan worden even waarschijnlijk is, geldt dat het verwachte gemiddeld aantal geëvacueerde pallets gelijk is aan  $\left(\frac{25+1}{2} + \frac{22+1}{2}\right) / 2 = 12,3$ . Dit komt over-

een met de uitkomsten van de simulaties.

In de tabellen van strategie B in bijlage D is ook te zien dat bij een hogere doorvoer de gemiddelde tijd die nodig is om te evacueren iets toeneemt. Bij een hoge doorvoer zijn er meer pallets van dezelfde datum en zijn er dus meer rijen die 1 soort datum bevatten. Wanneer dan geëvacueerd moet worden ligt de open rij verder weg dan bij een lagere doorvoer. Het kost dus iets meer tijd om de pallets naar de open rij te verplaatsen.

## 9. DISCUSSIE

In hoofdstuk 8 zijn de resultaten van de simulatie al besproken en vergeleken met de analytische uitkomsten. In dit hoofdstuk wordt besproken wat nog opvallende dingen zijn binnen het proces van onderzoek.

De manier waarop de optimale vrachtwagen oproep strategie tot stand is gekomen is niet helemaal goed onderbouwd. Er zijn nu een beetje op gevoel nieuwe aankomstintensiteiten gekozen voor de vrachtwagen oproep strategie. Om het echt goed te kunnen onderbouwen zijn meer experimenten nodig, maar hier was helaas geen tijd voor. De simulatie heeft teveel tijd nodig. Ook is niet helemaal duidelijk of de vrachtwagen oproep strategie zoals die is ontworpen voor strategie A, ook wel de optimale oproep strategie is voor bij strategie B. Tijdens het onderzoek is hier minder aandacht aan besteed omdat voornamelijk het doel was om de doorvoer te maximaliseren en de twee strategieën A en B te vergelijken. Tijdens het onderzoek bleek echter dat een vrachtwagen oproep strategie noodzakelijk was om überhaupt het systeem te kunnen onderzoeken. Hier lag echter niet de focus van het onderzoek.

In dit onderzoek zijn vrachtwagen oproep strategie en maximale doorvoer apart van elkaar onderzocht. Waarschijnlijk kunnen nog betere resultaten bereikt worden als bij iedere doorvoer een nieuwe vrachtwagen oproep strategie ontworpen wordt. Maar ook hier was helaas niet genoeg tijd voor.

Daarnaast is de simulatie van strategie B

niet echt geverifieerd. Dit komt omdat het analytisch lastig is om er aan te rekenen. Wel is genoemd dat strategie A correct werkt en B is een vervolg hierop. Hierdoor kan verondersteld worden dat de simulatie van strategie B geen fouten in de basis bevat.

De gemiddelde bezettingsgraad is bij strategie A ongeveer 80% en bij strategie B ongeveer 85%. Het is volgens dit onderzoek niet mogelijk om deze bezettingsgraad te verhogen, omdat dan de kans dat pallets geweigerd worden te groot wordt. Dit komt door de stochastiek van het systeem waardoor het kan voorkomen dat er eerst veel pallets gebracht worden voordat er pallets gehaald worden. Op deze manier moet er dus een lagere bezettingsgraad zijn om deze golven van aankomende pallets te kunnen opvangen. Wanneer afgewisselend pallets gehaald en gebracht worden kan de bezettingsgraad hoger liggen. In theorie moet strategie B een bezettingsgraad van 98% aan kunnen, namelijk met maar 2 lege rijen. Hierbij moeten dan wel altijd eerst pallets opgehaald worden voordat er nieuwe pallets geplaatst kunnen worden. Dit zou bereikt kunnen worden door beter gebruik te maken van de box.

Strategie B zelf zou nog verbeterd kunnen worden door naar de dichtstbijzijnde lege rij te evacueren in plaats van naar de gereserveerde lege rij, zoals nu gebeurt. Op deze manier kan de behandeltijd van halende vrachtwagens misschien nog iets verkleind worden. Daarnaast kunnen beide simulaties realistischer gemaakt worden door bijvoorbeeld nog het transport van de vrachtwagen naar de lift en de juiste verdieping mee te nemen. Deze tijd zal echter een vaste waarde aannemen en zal dus geen invloed hebben op de algehele conclusies van dit onderzoek.

Een uitbreiding van dit onderzoek zou bestaan uit het beschouwen van meerdere verdiepingen van het magazijn of het gebruik van meerdere soorten producten.



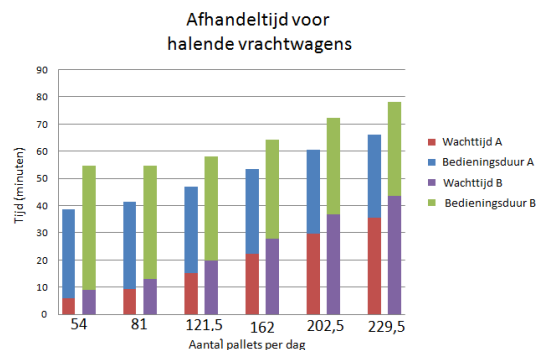
## 10. CONCLUSIE

Een vrachtwagen oproep strategie is nodig om te voorkomen dat het magazijn vol of leeg stroomt. Deze bestaat uit een bovengrens waarbij er gemiddeld drie brengende vrachtwagens minder opgeroepen worden en een ondergrens waarbij er gemiddeld drie halende vrachtwagens meer opgeroepen worden dan de normale doorvoer. Om een gemiddelde bezettingsgraad van 80% te hebben bij strategie A, worden als ondergrens 70% en als bovengrens 90% aangehouden. Bij een bezettingsgraad van 90% dreigt het magazijn namelijk vol te raken. Bij strategie B dreigt dit te gebeuren bij een bezettingsgraad van 95%, wat dus de bovengrens is voor de vrachtwagen oproep strategie. De ondergrens bij strategie B is 75%, zodat de gemiddelde bezettingsgraad op 85% uitkomt. Wanneer een bovengrens of de nieuwe aankomstintensiteit verhoogd wordt, worden er meer pallets geweigerd. Wanneer een ondergrens of de nieuwe aankomstintensiteit bij de ondergrens verlaagd wordt, daalt de gemiddelde bezettingsgraad. Het veranderen van de grenzen geeft een groter effect dan het veranderen van de nieuwe aankomstintensiteiten.

Het magazijn heeft dus een hogere gemiddelde bezettingsgraad wanneer er gebruik wordt gemaakt van strategie B. Hierbij worden pallets aaneengesloten op de dichtstbijzijnde open plaats geplaatst, maar er moet dan wel af en toe geëvacueerd worden om pallets op te kunnen halen. Het voordeel van deze strategie is dat de gemiddelde bezettingsgraad van het magazijn dus hoger ligt en dat er dus meer pallets in het magazijn opgeslagen kunnen worden. Het nadeel is echter dat door het moeten evacueren van pallets, de wachttijd van vrachtwagens hoger ligt dan wanneer gebruik wordt gemaakt van strategie A. Ook de bedieningsduur voor halende vrachtwagens ligt bij strategie B hoger dan bij strategie A. Voor een doorvoer van 9 halende en 9 brengende vrachtwagens per dag, zijn er voor een halende vrachtwagen gemiddeld 58 minuten nodig voor wachten en behandelen. Bij strategie A is dit gemiddeld 46 minuten. Wanneer

er een lagere doorvoer per dag is, daalt de gemiddeld wachttijd, maar stijgt de gemiddelde bedieningsduur. De totale wacht- en bedieningsduur neemt af bij een lagere doorvoer. De conclusie voor alle wacht- en bedienings tijden voor zowel strategie A als B staan in Figuur 10.

Om goed gebruik te kunnen maken van het magazijn moet dus een afweging gemaakt worden tussen de bezettingsgraad en de wacht- en behandeltijd van vrachtwagens. Wanneer *Magnastore* het belangrijk vindt om zoveel mogelijk pallets op te slaan in het magazijn, moet er gekozen worden voor strategie B. Wil men dat orders snel uitgeleverd kunnen worden, dan moet gekozen worden voor strategie A. Met behulp van Figuur 10 kan een beslissing genomen worden over de strategie en de doorvoer die gebruikt gaat worden in het magazijn.



**Figuur 10:** Voor strategie A en B een overzicht van hoe de afhandeltijd voor halende vrachtwagens is opgebouwd bij verschillende doorvoer.

## REFERENTIES

- [1] Tranex: *FAQ, Ruimte in de vrachtwagen*, 2014. <http://www.tranex.nl/1338.htm>, bezocht op 18-04-2016.
- [2] Roodbergen, K. J. and Vis, I. F. A.: *A survey of literature on automated storage and retrieval systems*. *European Journal of Operational Research*, 194(2):343–362, 2009.
- [3] Yu, Y. en R. B. M. De Koster: *Sequencing heuristics for storing and retrieving unit loads in 3D compact automated warehousing systems*. *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, 44(2):69–87, 2012.
- [4] Hausman, Warren H., Leroy B. Schwarz, en Stephen C. Graves: *Optimal Storage Assignment in Automatic Warehousing Systems*. *Management Science*, 22(6):629–638, 1976.
- [5] Sarker, Bhaba R. en P. Sobhan Babu: *Travel time models in automated storage/retrieval systems: A critical review*. *International Journal of Production Economics*, 40(2-3):173–184, 1995.
- [6] Bozer, Yavuz A. en John A. White: *Travel-Time Models for Automated Storage/Retrieval Systems*. *IIE Transactions*, 16(4):329–338, 1984.
- [7] Sari, Z., C. Saygin, en N. Ghouali: *Travel-time models for flow-rack automated storage and retrieval systems*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25(9-10):979–987, 2005.
- [8] Ghomri, L. en Z. Sari: *Mathematical modeling of retrieval travel time for flow-rack automated storage and retrieval systems*. In *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, volume 48, pagina's 1906–1911, 2015.
- [9] Yu, Y. en M. B. M. De Koster: *Designing an optimal turnover-based storage rack for a 3D compact automated storage and retrieval system*. *International Journal of Production Research*, 47(6):1551–1571, 2009.
- [10] Ridder, Wendy de: *Robust Storage Assignment In 3D Warehouses*. scriptie, Erasmus University Rotterdam, 2013.
- [11] Yu, M. en X. Qi: *Storage space allocation models for inbound containers in an automatic container terminal*. *European Journal of Operational Research*, 226(1):32–45, 2013.
- [12] Onggo, Bhakti, Gunal, Maden: *The Conceptual Model of a Distribution Warehouse Simulation*. *Operational Research Society 4th Simulation Workshop*, April 2008.
- [13] Li-Xin, Zhang: *Ch1: Brownian motion*. [www.math.zju.edu.cn/zlx/forphd/stochcalculuslecture.pdf](http://www.math.zju.edu.cn/zlx/forphd/stochcalculuslecture.pdf), bezocht op 08-06-16, paragraaf 1.6.2.

## A. SYMBOLENIJST

In onderstaande tabel is een overzicht gegeven van de gebruikte symbolen in dit artikel.

Symbool	Betekenis
$\mu_B$	De aankomst intensiteit van brengende vrachtwagens per dag. Tevens ook de doorvoer.
$\mu_H$	De aankomst intensiteit van halende vrachtwagens per dag.
$R$	De lijst binnen het simulatie model die het magazijn representeert, alle aanwezige pallets staan hierin.
$W_H$	Gemiddelde wachttijd halende vrachtwagens.
$W_B$	Gemiddelde wachttijd brengende vrachtwagens.
$BD_H$	Gemiddelde bedieningsduur voor halende vrachtwagens.
$BD_B$	Gemiddelde bedieningsduur voor brengende vrachtwagens.
$F_P$	De gemiddelde verblijftijd van de pallets in het magazijn.
$F_{box,B}$	De gemiddelde verblijftijd in de box van pallets die daar tijdelijk opgeslagen worden voordat ze in het magazijn opgeslagen kunnen worden.
$F_{box,H}$	De gemiddelde verblijftijd in de box van pallets die daar tijdelijk opgeslagen worden, totdat ze door een vrachtwagen opgehaald worden.
$N_e$	Het gemiddeld aantal pallets dat geëvacueerd wordt.
$T_e$	De gemiddelde tijd die nodig is om een evacuatie van een rij uit te voeren.
$N_w$	Is het percentage van pallets die eigenlijk geweigerd worden bij brengende vrachtwagens, ten opzichte van het totaal aantal binnenkomende pallets.
$N_o$	Het percentage van de pallets van de orders die niet voldaan konden worden, ten opzichte van het totaal aantal orders.
$T_{ow}$	De gemiddelde overwerktijd na de reguliere 15 uur werken op een dag.
$R_{scc}$	De gemiddelde single command cycle reistijd van de shuttle en SIBA samen.
$\rho$	De gemiddelde bezettingsgraad van het magazijn.
$\mu_{shuttle}$	De tijd die de shuttle nodig heeft om naar de juiste rij te rijden.
$\mu_{SIBA}$	De tijd die de SIBA nodig heeft om door de rij naar de juiste positie te rijden.
$T$	De stochastische variabele voor het aantal pallets dat op een dag aankomt.
$N$	De stochastische variabele voor het aantal vrachtwagens dat op een dag aankomt.
$B$	De stochastische variabele voor het aantal pallets in een vrachtwagen.
$V$	De stochastische variabele voor het verschil tussen inkomende en uitgaande pallets op een dag.
$B(t)$	De Brownse beweging voor het verschil in aantal pallets na dag $t$ .
$Z$	De standaard normaal verdeelde stochastische variabele.
$Q\%$	De bovengrens bij de vrachtwagen oproep strategie.
$q\%$	De ondergrens bij de vrachtwagen oproep strategie.
BHI	Afkorting voor betrouwbaarheidsinterval.

**Tabel 10:** Een lijst van gebruikte symbolen

## B. SIMULATIE MODEL

In deze bijlage worden de details van de simulatie beschreven. Eerst worden de gebruikte variabelen voor de layout van het systeem omschreven in paragraaf B.1. In paragraaf B.2 worden de statistische tellers omschreven die gebruikt zijn om de waarden van de prestatie-maten te berekenen.

### B.1. LAYOUT

- *beschikbaar* is een lijst die de indices van de rijen bevat waar een nieuwe pallet geplaatst mag worden.
- *legerijen* is een lijst die de indices van de compleet lege rijen bevat.
- *NHbox* is het getal dat aangeeft hoeveel pallets er in de box staan die direct opgehaald kunnen worden.
- *NBbox* is het getal dat aangeeft hoeveel pallets er in de box staan die gebracht zijn en nog niet verwerkt.
- *Shuttle* is een getal, wanneer deze 0 is, is de shuttle vrij. Bij de waarde 1 is de shuttle bezig.
- *Oudste* is een getal dat aangeeft wat de datum is van de oudste pallet die op dat moment aanwezig is in het magazijn.
- *n*, *m* zijn getallen en geven aan hoeveel pallets een vrachtwagen brengt, respectievelijk komt halen.
- *NQ* geeft aan hoeveel halende en brengende vrachtwagens wachten totdat ze behandeld worden. Dit is dus een lijst van lengte twee.
- *putat* bevat de locatie waar een pallet heen gebracht moet worden.
- *collectat* bevat de locatie van de pallet die opgehaald moet worden.
- *evacueren* bevat de pallets die geëvacueerd moeten worden.

### B.2. STATISTISCHE TELLERS

- *NwachtH*: aantal halende vrachtwagens die gewacht hebben.
- *NwachtB*: aantal brengende vrachtwagens die gewacht hebben.
- *NbehandelH*: aantal halende vrachtwagens die behandeld zijn.
- *NbehandelB*: aantal brengende vrachtwagens die behandeld zijn.
- *TwachtH*: totale tijd die halende vrachtwagens gewacht hebben.
- *TwachtB*: totale tijd die brengende vrachtwagens gewacht hebben.
- *TbehandelH*: totale tijd die halende vrachtwagens behandeld zijn.
- *TbehandelB*: totale tijd die brengende vrachtwagens behandeld zijn.
- *Nevacuated*: totaal aantal pallets dat geëvacueerd is.
- *Nkeer*: aantal keren dat een evacuatie plaatsvond.
- *Tevacueer*: totale tijd die nodig was om te evacueren.
- *Nverblijf*: aantal pallets dat in het magazijn verbleven is.
- *Tverblijf*: totale tijd die pallets in magazijn hebben gestaan.
- *weiger*: aantal eigenlijk geweigerde pallets.
- *aantalbezet*: aantal pallets op dit moment in het magazijn.
- *NpalletsH*: aantal pallets dat op een dag gehaald is.
- *NpalletsB*: aantal pallets dat op een dag gebracht is.
- *IN*: aantal pallets dat op een dag aangeboden is.

- *OUT*: aantal pallets dat op een dag opgevraagd is.
- *overwerktijd*: totale tijd die na sluiting is doorgewerkt.
- *overwerkdag*: aantal dagen dat na sluiting gewerkt werd.
- *verblijfTboxB*: totale verblijftijd in box van gebrachte pallets.
- *verblijfNboxB*: aantal gebrachte pallets dat in de box verbleef.
- *verblijfTboxH*: totale verblijftijd in box van gehaalde pallets.
- *verblijfNboxH*: aantal gehaalde pallets dat in de box verbleef.
- *Nshuttlereis*: aantal keer dat de shuttle een Single Command Cycle deed.
- *Tshuttlereis*: totale tijd die shuttle onderweg is geweest.
- *Tbezettingsgraad*: totale bezettingsgraad over alle dagen.
- *nietopgehaald*: aantal ordes dat niet voltooid is.

### C. GEBRUIKTE PROGRAMMA'S

In deze bijlage wordt een overzicht gegeven van de programma's die gebruikt zijn tijdens dit onderzoek.

Naam	Type	Omschrijving	Gebruikt in
gemiddelde reistijd	Python	De gemiddelde reistijd van de shuttle wordt hier analytisch uitgerekend.	Paragraaf 5.1
volleeg	Python	Een vereenvoudigde simulatie waarbij gekeken wordt in hoeveel gevallen het magazijn vol dan wel leeg raakt binnen een aantal dagen.	Paragraaf 5.3
kansrekening	Excel	Analytisch m.b.v. Brownse beweging wordt de kans dat het magazijn vol of leeg raakt binnen een aantal dagen berekend. Hier wordt een grafiek van gemaakt waarbij ook de simulatie resultaten vermeld worden.	Paragraaf 5.3
gemiddelde reistijd vertrekproces	Python	De gemiddelde reistijd van de shuttle wordt analytisch berekend in het speciale geval dat alleen naar het vertrekproces gekeken wordt. Hierbij wordt ook de variantie van deze verdeling voor de bedieningsduur berekend.	Paragraaf 5.5
analytisch vertrek proces	Excel	m.b.v de Pollaczek-Khintchine formule wordt de wachttijd van halende vrachtwagen analytisch uitgerekend.	Paragraaf 5.5
simulatie vertrekproces	Python	Bij deze simulatie wordt er alleen naar het leeghalen van het magazijn gekeken.	Paragraaf 5.5
Pallet	Python	De klasse die voor het object Pallet in Python zorgt	Simulatie
palletsinitieel	Python	3 verschillende initiële inrichtingen voor het magazijn die aangeroepen kunnen worden	Simulatie
TijdTrekken	Python	Een verzameling van functies die aangeroepen kunnen worden, waaronder; trekken uit exponentiële verdeling voor tussenaankomsttijden, trekken uit binomiale verdeling en reistijden van de shuttle voor ophalen, wegbrengen en evacueren.	Simulatie
Magazijn simulatie A	Python	De simulatie voor strategie A	Hoofdstuk 8
Magazijn simulatie B	Python	De simulatie voor strategie B	Hoofdstuk 8
grafieken	Excel	Er worden grafieken gemaakt van de data van de experimenten bij verschillende doorvoer.	Paragraaf 8.2

## D. RESULTATEN DOORVOER EXPERIMENTEN

**Tabel 11:** De prestatie­maten bij strategie A, doorvoer 4.

Prestatiemaat	95% BHI
$W_H$ (min)	[ 5,8 ; 6,0 ]
$W_B$ (min)	[ 8,8 ; 9,2 ]
$BD_H$ (min)	[ 32,6 ; 32,7 ]
$BD_B$ (min)	[ 32,3 ; 32,7 ]
$F_P$ (dagen)	[ 36,5 ; 37,2 ]
$F_{box,B}$ (uren)	[ 17,7 ; 19,9 ]
$N_w$ (%)	[ 0,1 ; 0,3 ]
$N_o$ (%)	[ 0 ; 0 ]
$T_{ow}$ (min)	[ 28,3 ; 29,7 ]
$R_{SCC}$ (sec)	[ 145 ; 145 ]
$\rho$ (%)	[ 75,7 ; 76,3 ]

**Tabel 13:** De prestatie­maten bij strategie A, doorvoer 6.

Prestatiemaat	95% BHI
$W_H$ (min)	[ 9,2 ; 9,4 ]
$W_B$ (min)	[ 17,1 ; 17,6 ]
$BD_H$ (min)	[ 32,0 ; 32,1 ]
$BD_B$ (min)	[ 31,8 ; 31,9 ]
$F_P$ (dagen)	[ 25,1 ; 25,5 ]
$F_{box,B}$ (uren)	[ 17,4 ; 18,5 ]
$N_w$ (%)	[ 0,5 ; 0,6 ]
$N_o$ (%)	[ 0 ; 0 ]
$T_{ow}$ (min)	[ 34,8 ; 36,5 ]
$R_{SCC}$ (sec)	[ 142 ; 143 ]
$\rho$ (%)	[ 78,1 ; 78,7 ]

**Tabel 12:** De prestatie­maten bij strategie B, doorvoer 4.

Prestatiemaat	95% BHI
$W_H$ (min)	[ 8,8 ; 9,1 ]
$W_B$ (min)	[ 12,7 ; 13,3 ]
$BD_H$ (min)	[ 45,5 ; 45,8 ]
$BD_B$ (min)	[ 31,5 ; 31,6 ]
$F_P$ (dagen)	[ 40,7 ; 41,4 ]
$F_{box,B}$ (uren)	[ 11,2 ; 16,8 ]
$F_{box,H}$ (min)	[ 78,7 ; 82,0 ]
$N_w$ (%)	[ 0 ; 0,1 ]
$N_o$ (%)	[ 0 ; 0 ]
$T_{ow}$ (min)	[ 34,7 ; 36,0 ]
$R_{SCC}$ (sec)	[ 141 ; 142 ]
$N_e$ (#)	[ 12,3 ; 12,5 ]
$T_e$ (min)	[ 64,7 ; 65,4 ]
$\rho$ (%)	[ 84,6 ; 85,6 ]

**Tabel 14:** De prestatie­maten bij strategie B, doorvoer 6.

Prestatiemaat	95% BHI
$W_H$ (min)	[ 12,8 ; 13,2 ]
$W_B$ (min)	[ 23,0 ; 23,8 ]
$BD_H$ (min)	[ 41,4 ; 41,7 ]
$BD_B$ (min)	[ 31,3 ; 31,5 ]
$F_P$ (dagen)	[ 27,1 ; 27,7 ]
$F_{box,B}$ (uren)	[ 12,8 ; 16,2 ]
$F_{box,H}$ (min)	[ 47,0 ; 49,4 ]
$N_w$ (%)	[ 0,01 ; 0,05 ]
$N_o$ (%)	[ 0 ; 0 ]
$T_{ow}$ (min)	[ 40,9 ; 42,0 ]
$R_{SCC}$ (sec)	[ 140 ; 141 ]
$N_e$ (#)	[ 12,4 ; 12,5 ]
$T_e$ (min)	[ 66,2 ; 66,9 ]
$\rho$ (%)	[ 84,6 ; 85,8 ]

**Tabel 15:** De prestatie­maten bij strategie A, doorvoer 9.

Prestatiemaat	95% BHI
$W_H$ (min)	[ 15,1 ; 15,4 ]
$W_B$ (min)	[ 40,2 ; 41,6 ]
$BD_H$ (min)	[ 31,6 ; 31,7 ]
$BD_B$ (min)	[ 31,4 ; 31,6 ]
$F_P$ (dagen)	[ 17,1 ; 17,5 ]
$F_{box,B}$ (uren)	[ 16,5 ; 18,8 ]
$N_w$ (%)	[ 0,6 ; 1,0 ]
$N_o$ (%)	[ 0 ; 0 ]
$T_{ow}$ (min)	[ 52,4 ; 54,5 ]
$R_{SCC}$ (sec)	[ 140 ; 141 ]
$\rho$ (%)	[ 79,6 ; 80,8 ]

**Tabel 16:** De prestatie­maten bij strategie B, doorvoer 9.

Prestatiemaat	95% BHI
$W_H$ (min)	[ 19,7 ; 20,0 ]
$W_B$ (min)	[ 51,6 ; 52,6 ]
$BD_H$ (min)	[ 38,2 ; 38,4 ]
$BD_B$ (min)	[ 31,2 ; 31,4 ]
$F_P$ (dagen)	[ 18,1 ; 18,4 ]
$F_{box,B}$ (uren)	[ 14,8 ; 17,2 ]
$F_{box,H}$ (min)	[ 26,3 ; 27,7 ]
$N_w$ (%)	[ 0,1 ; 0,3 ]
$N_o$ (%)	[ 0 ; 0 ]
$T_{ow}$ (min)	[ 63,0 ; 64,4 ]
$R_{SCC}$ (sec)	[ 139 ; 140 ]
$N_e$ (#)	[ 12,4 ; 12,5 ]
$T_e$ (min)	[ 67,5 ; 68,0 ]
$\rho$ (%)	[ 84,5 ; 85,4 ]

**Tabel 17:** De prestatie­maten bij strategie A, doorvoer 12.

Prestatiemaat	95% BHI
$W_H$ (min)	[ 22,0 ; 22,5 ]
$W_B$ (min)	[ 85,2 ; 87,2 ]
$BD_H$ (min)	[ 31,1 ; 31,3 ]
$BD_B$ (min)	[ 31,1 ; 31,2 ]
$F_P$ (dagen)	[ 12,8 ; 13,0 ]
$F_{box,B}$ (uren)	[ 16,3 ; 18,1 ]
$N_w$ (%)	[ 0,3 ; 0,6 ]
$N_o$ (%)	[ 0 ; 0 ]
$T_{ow}$ (min)	[ 90,4 ; 92,8 ]
$R_{SCC}$ (sec)	[ 138 ; 139 ]
$\rho$ (%)	[ 79,5 ; 80,5 ]

**Tabel 18:** De prestatie­maten bij strategie B, doorvoer 12.

Prestatiemaat	95% BHI
$W_H$ (min)	[ 27,5 ; 28,0 ]
$W_B$ (min)	[ 105,3 ; 107,8 ]
$BD_H$ (min)	[ 36,4 ; 36,6 ]
$BD_B$ (min)	[ 31,1 ; 31,2 ]
$F_P$ (dagen)	[ 13,6 ; 13,9 ]
$F_{box,B}$ (uren)	[ 17,2 ; 18,7 ]
$F_{box,H}$ (min)	[ 17,3 ; 18,8 ]
$N_w$ (%)	[ 0,5 ; 0,8 ]
$N_o$ (%)	[ 0 ; 0 ]
$T_{ow}$ (min)	[ 110,5 ; 112,9 ]
$R_{SCC}$ (sec)	[ 139 ; 139 ]
$N_e$ (#)	[ 12,2 ; 12,3 ]
$T_e$ (min)	[ 68,2 ; 68,7 ]
$\rho$ (%)	[ 84,5 ; 85,6 ]



**Tabel 19:** De prestatie maten bij strategie A, doorvoer 15.

Prestatiemaat	95% BHI
$W_H$ (min)	[ 29,5 ; 30,1 ]
$W_B$ (min)	[ 162,1 ; 166,1 ]
$BD_H$ (min)	[ 30,8 ; 30,9 ]
$BD_B$ (min)	[ 30,7 ; 30,9 ]
$F_P$ (dagen)	[ 10,2 ; 10,4 ]
$F_{box,B}$ (uren)	[ 17,2 ; 19,4 ]
$N_w$ (%)	[ 0,3 ; 0,6 ]
$N_o$ (%)	[ 0 ; 0 ]
$T_{ow}$ (min)	[ 162,4 ; 166,1 ]
$R_{SCC}$ (sec)	[ 137 ; 138 ]
$\rho$ (%)	[ 79,5 ; 80,6 ]

**Tabel 20:** De prestatie maten bij strategie B, doorvoer 15.

Prestatiemaat	95% BHI
$W_H$ (min)	[ 36,6 ; 37,2 ]
$W_B$ (min)	[ 196,0 ; 199,2 ]
$BD_H$ (min)	[ 35,2 ; 35,3 ]
$BD_B$ (min)	[ 31,0 ; 31,1 ]
$F_P$ (dagen)	[ 10,9 ; 11,0 ]
$F_{box,B}$ (uren)	[ 18,1 ; 19,2 ]
$F_{box,H}$ (min)	[ 13,5 ; 15,0 ]
$N_w$ (%)	[ 0,7 ; 0,9 ]
$N_o$ (%)	[ 0 ; 0 ]
$T_{ow}$ (min)	[ 196,6 ; 199,5 ]
$R_{SCC}$ (sec)	[ 138 ; 138 ]
$N_e$ (#)	[ 12,2 ; 12,4 ]
$T_e$ (min)	[ 69,2 ; 69,6 ]
$\rho$ (%)	[ 84,5 ; 85,2 ]

**Tabel 21:** De prestatie maten bij strategie A, doorvoer 17.

Prestatiemaat	95% BHI
$W_H$ (min)	[ 35,1 ; 35,8 ]
$W_B$ (min)	[ 228,5 ; 232,8 ]
$BD_H$ (min)	[ 30,5 ; 30,7 ]
$BD_B$ (min)	[ 30,5 ; 30,7 ]
$F_P$ (dagen)	[ 9,0 ; 9,2 ]
$F_{box,B}$ (uren)	[ 18,7 ; 20,9 ]
$N_w$ (%)	[ 0,5 ; 0,9 ]
$N_o$ (%)	[ 0 ; 0 ]
$T_{ow}$ (min)	[ 233,5 ; 237,4 ]
$R_{SCC}$ (sec)	[ 136 ; 136 ]
$\rho$ (%)	[ 79,1 ; 80,3 ]

**Tabel 22:** De prestatie maten bij strategie B, doorvoer 17.

Prestatiemaat	95% BHI
$W_H$ (min)	[ 43,2 ; 43,9 ]
$W_B$ (min)	[ 271,6 ; 276,2 ]
$BD_H$ (min)	[ 34,5 ; 34,7 ]
$BD_B$ (min)	[ 30,8 ; 31,0 ]
$F_P$ (dagen)	[ 9,6 ; 9,7 ]
$F_{box,B}$ (uren)	[ 18,2 ; 19,5 ]
$F_{box,H}$ (min)	[ 12,8 ; 14,5 ]
$N_w$ (%)	[ 0,8 ; 1,4 ]
$N_o$ (%)	[ 0 ; 0 ]
$T_{ow}$ (min)	[ 275,5 ; 278,9 ]
$R_{SCC}$ (sec)	[ 137 ; 138 ]
$N_e$ (#)	[ 12,2 ; 12,4 ]
$T_e$ (min)	[ 69,4 ; 69,8 ]
$\rho$ (%)	[ 84,2 ; 85,0 ]