

2011  
2012

## BEDRIJFSECONOMISCHE WETENSCHAPPEN

*master in de toegepaste economische wetenschappen:  
handelsingenieur: operationeel management en logistiek*

### Masterproef

*Verbetering van de productiviteit van een container  
terminal door efficiënte opslag van containers*

Promotor :  
Prof. dr. Gerrit JANSSENS

### Philippe Verjans

*Masterproef voorgedragen tot het bekomen van de graad van master in de toegepaste  
economische wetenschappen: handelsingenieur, afstudeerrichting operationeel management  
en logistiek*

2011  
2012

# BEDRIJFSECONOMISCHE WETENSCHAPPEN

*master in de toegepaste economische wetenschappen:  
handelsingenieur: operationeel management en logistiek*

## Masterproef

*Verbetering van de productiviteit van een container  
terminal door efficiënte opslag van containers*

Promotor :  
Prof. dr. Gerrit JANSSENS

## Philippe Verjans

*Masterproef voorgedragen tot het bekomen van de graad van master in de toegepaste  
economische wetenschappen: handelsingenieur, afstudeerrichting operationeel management  
en logistiek*

## Samenvatting

Wereldwijd is er een stijgende trend merkbaar van het maritiem transport van containers. Deze stijging heeft als gevolg dat de havens voldoende capaciteit nodig hebben om deze stroom van containers te stockeren en te verwerken. Deze grotere capaciteit in de havens kan op twee manieren gerealiseerd worden, via een uitbreiding van de oppervlakte voor de opslag van containers en via een stijging in de productiviteit. Aangezien een uitbreiding van de haven vaak niet mogelijk is omwille van verschillende redenen, zoals gebrek aan open ruimte en problemen met regularisatie, concentreren de havens zich op de verbetering van hun productiviteit.

De voornaamste factor waar rekening mee wordt gehouden bij het evalueren van de productiviteit van een container terminal is de (gemiddelde) verwerkingscapaciteit, het aantal containers dat per jaar behandeld worden. Deze verwerkingscapaciteit is afhankelijk van het verminderen van de doorlooptijd van de containers. Één van de factoren die invloed heeft op deze doorlooptijd is de bezettingsgraad van de machines. Wanneer de stroom van containers tussen de verschillende machines vlot verloopt, worden de containers op een minimale tijd behandeld. In dit geval kunnen de machines ingezet worden bij andere schepen die geladen of gelost moeten worden, waardoor het aantal containers verwerkt per jaar stijgt. Belangrijk hierbij is de tijd dat machines niet gebruikt worden. Als men deze *idle time* kan verminderen, verbetert de bezettingsgraad en verhoogt de productiviteit van de haven.

De doorlooptijd van de containers kan ook verminderd worden door het efficiënter opslaan van de containers. Wanneer containers op elkaar gestapeld worden, bestaat er de kans dat er onnodige handelingen nodig zijn om een onderliggende container te kunnen verplaatsen. Het verplaatsen van containers die gestapeld zijn op de container die men moet verplaatsen wordt *re-stacking* genoemd. Dit is verspilling van tijd en geld omdat kostbare werkingstijd moet besteed worden aan een container die men niet nodig heeft op dat moment. Het minimaliseren van het aantal te verplaatsen containers binnen de container terminal zelf, draagt bij tot een verhoging van de productiviteit

In deze masterproef wordt er gefocust op de opslag van containers om zo de productiviteit van een container terminal te verbeteren. In de literatuur zijn vier verschillende categorieën van modellen terug te vinden die trachten de opslag van containers te optimaliseren. Een eerste categorie van modellen heeft als doel om de tijd dat een schip of een container doorbrengt in de haven te minimaliseren. Een ander soort model focust zich meer op enkel de opslag van containers en hierbij probeert men het aan *re-handles* te minimaliseren. Een derde categorie vergelijkt verschillende stapelstrategieën met elkaar. De vierde en laatste categorie die in de literatuur terug te vinden is, bestaat uit modellen die ook de financiële kostprijs van bepaalde handelingen in rekening nemen. Aangezien data in verband met kosten erg moeilijk te vinden is omwille van de concurrentie tussen

havens onderling, wordt er geen model nagebouwd van deze laatste categorie van modellen. De andere drie soorten modellen worden aan de hand van twee modellen besproken.

Vooraleer deze bespreking kan plaatsvinden, is het nodig om eerst wat extra informatie te verschaffen aan de lezer van deze masterproef. Deze informatie begint met de definitie van enkele basisbegrippen zoals containers en container terminals. Vervolgens worden de werking, opbouw en types van container terminals verder toegelicht. De gebruikte apparatuur op de terminals is het volgende onderwerp dat wordt uitgewerkt. Zowel de verschillende soorten kranen, de verschillende interne en externe transportmodi en het laadplan komen aan bod. In een volgend hoofdstuk worden de gevonden modellen in de literatuur ingedeeld in één van de vier voornoemde categorieën om uiteindelijk een keuze te maken welke modellen nagebouwd worden.

Het eerste model dat besproken wordt is een lineair programmeringsprobleem dat een doelfunctie bevat die op zoek gaat naar de minimale *makespan*, de tijd die nodig is om alle inkomende containers te behandelen. Wegens onvoorziene omstandigheden zijn geen resultaten gegenereerd kunnen worden, waardoor een kritische bespreking van het model in de plaats is gekomen. Het tweede model is een analytisch model dat op zoek gaat naar de manier van opslag zodat het aantal onproductieve verplaatsingen minimaal is. Hierbij vergelijkt dit model drie voorgestelde stapelstrategieën. Na de bespreking van de resultaten wordt een voorkeur gegeven aan één van de drie strategieën. Na de bespreking van beide modellen volgt er nog een conclusie waarbij de meest opmerkelijke resultaten nog eens worden opgesomd.

## Voorwoord

Deze masterproef met als onderwerp 'Verbetering van de productiviteit van een container terminal door efficiënte opslag van containers' kadert in mijn opleiding tot Handelsingenieur aan de Universiteit Hasselt. Dit gaf mij de mogelijkheid om een onderwerp diepgaander te bestuderen dat nauw aansluit bij mijn major afstudeerrichting 'Operationeel Management en Logistiek'. Het optimalisatie aspect van dit onderwerp was één van de belangrijkste redenen voor de keuze van dit onderwerp. Door het uitwerken van dit onderwerp heb ik een beter beeld gekregen over de werking van terminals in havens. Hopelijk komt deze kennis mij van pas in mijn loopbaan.

Graag zou ik enkele personen willen bedanken voor alle steun en hulp in verband met het uitwerken van deze masterproef. In de eerste plaats wil ik mijn promotor Prof. dr. Janssens bedanken voor alle tijd die hij heeft gespendeerd aan het oplossen van mijn vragen en het uitspitten van formules uit de nagebouwde modellen. Een andere persoon die ik zeker niet mag vergeten te danken voor haar hulp bij het uitwerken van model in LINGO is doctoraatstudente Lotte Verdonck. Zonder deze twee personen zou dit resultaat nooit behaald zijn.

Tenslotte zou ik enkele personen willen bedanken in verband met de afgelopen vijf jaar op deze universiteit. In de eerste plaats wil ik mijn familie en met name mijn ouders bedanken voor alle steun die ik ontvangen heb. Zij stonden altijd klaar in zowel positieve als negatieve periodes. Mijn medestudenten en vrienden wil ik ook bedanken voor de afgelopen 5 jaar vol fijne momenten.

## Inhoudstafel

Samenvatting .....	I
Voorwoord .....	III
Inhoudstafel .....	IV
Hoofdstuk 1: Inleiding .....	1
1.1.    Probleemstelling .....	1
1.2.    Praktische relevantie.....	2
1.3.    Probleemeigenaar en andere betrokkenen .....	3
Hoofdstuk 2: Onderzoeksvragen .....	5
2.1.    Centrale onderzoeksvraag .....	5
2.2.    Deelvragen .....	5
Hoofdstuk 3: Literatuurstudie .....	7
3.1.    Inleiding .....	7
3.2.    Containers.....	7
3.3.    Container terminal.....	8
3.3.1.    Definities van een container terminal .....	8
3.3.2.    Werking van een container terminal.....	9
3.3.3.    Opbouw van een container terminal.....	12
3.3.4.    Verschillende types van een container terminal .....	13
3.3.5.    Plannings- en controle niveaus gebruikt bij container terminals .....	15
3.3.6.    Apparatuur gebruikt in container terminals .....	15
3.3.6.1. <i>Kranen</i> .....	16
3.3.6.2. <i>Interne transportmodi</i> .....	20
3.3.6.3. <i>Externe transportmodi</i> .....	22
3.3.6.4. <i>Het laadplan</i> .....	22
3.4.    Evaluatie van container terminals .....	23
3.5.    Opslag van containers.....	25
3.5.1.    Strategieën om containers te stapelen .....	25
3.5.2.    Re-stacking.....	27

Hoofdstuk 4: Modellen voor de opslag van containers .....	29
4.1. Algemeen aanvaarde principes .....	29
4.2. Minimaliseren van de doorlooptijd .....	29
4.3. Minimaliseren van de kosten .....	30
4.4. Minimaliseren van het aantal herverplaatsingen van containers .....	31
4.5. Keuze van de modellen die uitgewerkt worden .....	34
4.6. Redenen om deze modellen uit te werken .....	34
Hoofdstuk 5: Uitwerking van de modellen .....	35
5.1. 'Integrating simulation and optimization to schedule loading operations in container terminals' van Zeng en Yang (2009) .....	35
5.1.1. Inleiding .....	35
5.1.2. Probleem parameters .....	36
5.1.3. Beslissingsvariabelen .....	37
5.1.4. Het planningsmodel .....	37
5.1.5. Implementatie van het model in de optimalisatiesoftware LINGO .....	38
5.1.6. Kritische bespreking van het model .....	40
5.2. Model 2: 'Space allocating strategies for improving import yard performance at marine terminals' van Sauri en Martin (2011) .....	46
5.2.1. Inleiding .....	46
5.2.2. Stapelstrategieën .....	46
5.2.3. Veronderstellingen .....	48
5.2.4. Variabelen .....	48
5.2.5. Toelichting van het analytisch model .....	49
5.2.6. Implementatie van het analytisch model in een rekenblad .....	61
5.2.7. Vergelijking van alternatieve scenario's .....	68
5.2.7.1. Scenario 1 .....	68
5.2.7.2. Scenario 2 .....	73
5.2.8. Resultaten en bespreking model .....	79
Hoofdstuk 6: Conclusie .....	81
Referenties .....	83
Bijlagen .....	87
Bijlage 1 .....	87
Bijlage 2 .....	89

Scenario 1: .....	89
<i>Werkblad: 'Data'</i> .....	89
<i>Werkblad: 'Homogeneous stack'</i> .....	90
<i>Werkblad: 'Integral homogeneous stack'</i> .....	91
<i>Werkblad: 'Heterogeneous stack'</i> .....	92
<i>Werkblad: 'Value <math>E_{ij}(R(t))</math>'</i> .....	93
<i>Werkblad: 'Integral Heterogeneous stack'</i> .....	94
<i>Werkblad: 'Stack delta and C S1'</i> .....	95
<i>Werkblad: 'Stack delta and C S2'</i> .....	97
<i>Werkblad: 'Stack delta and C S3'</i> .....	99
<i>Werkblad: 'Number of rehandles per strategy'</i> .....	101
<i>Werkblad: 'Calculation sheet'</i> .....	102
Scenario 2: .....	102



# Hoofdstuk 1: Inleiding

## 1.1. Probleemstelling

Wereldwijd is een stijgende trend merkbaar van het maritiem transport van containers. De website van de haven van Antwerpen bevat cijfers met betrekking tot het aantal verwerkte containers per jaar. Er is een stijging merkbaar van 17.5% van het aantal containers die verwerkt werden tussen de jaren 2009 en 2010 in de haven van Antwerpen. Deze stijging heeft als gevolg dat de haven voldoende capaciteit nodig heeft om deze stroom van containers te stockeren en te verwerken. Deze grotere capaciteit in de haven kan op twee manieren gerealiseerd worden, via een uitbreiding van de oppervlakte voor de opslag van containers en via een stijging in de productiviteit (Dam Le-Griffin & Murphy, 2006).

De haven van Antwerpen is net als vele andere gerenommeerde, voornamelijk Europese, havens gevestigd in een sterk verstedelijkte omgeving. Dit houdt in dat er nauwelijks uitbreidingsmogelijkheden zijn door een tekort aan beschikbaar land (Notteboom & Rodrigue, 2005).

Omdat ruimte schaarser wordt en de terminals een steeds groter aantal containers moeten behandelen, wordt meer en meer in de hoogte gestapeld (Steenken, Voß, & Stahlbock, 2004). Hierdoor is de kans groter dat men containers in de haven moet verplaatsen omdat deze andere containers blokkeren die op een schip geladen moeten worden. Dit fenomeen van herverplaatsingen wordt in de literatuur door verschillende auteurs besproken en wordt *re-stacking*, *rehandling* of ook wel *reshuffling* genoemd. Een verdere uitwerking van dit begrip bevindt zich bij de literatuurstudie.

De totale tijd die schepen doorbrengen in havens bestaat uit de tijd om de haven binnen en terug buiten te varen, de tijd om aan te meren en terug weg te varen van de kade, de voorbereidingstijd aan de kade en het feitelijke laden en lossen van het schip (Dekker, Voogd, van Asperen, 2007). Uit verschillende modellen die worden besproken in deze masterproef blijkt dat het hoofddoel van deze modellen is om de tijd die het schip doorbrengt in de haven te minimaliseren. De re-allocatie van containers in de haven zorgt voor langere wachttijden voor de schepen die geladen moeten worden. Dit heeft dus ook een negatief effect op de tijd die schepen, die geladen of gelost moeten worden, doorbrengen in de haven.

Elk uur dat een transportschip stil ligt aan de kade van een haven kost handenvol geld. Daarom is het van belang dat havens de schepen zo snel mogelijk kunnen verwerken waardoor de *idle time* van deze schepen geminimaliseerd wordt. Dekker et al. (2007) stelt ook nog dat grote vrachtschepen duurder zijn om aan te kopen. De kostprijs van de onproductieve tijd van deze schepen per uur is hoger dan

deze van kleinere vrachtschepen. Om de tijd die doorgebracht wordt in een haven te minimaliseren, ontstaat de nood aan een verbetering van de efficiëntie van de havens.

Om de productiviteit van een container terminal te beoordelen, maakt men gebruik van verschillende factoren. In Steenken et al. (2004) geeft men aan dat men zowel de tijd doorgebracht in de haven als het gebruikspercentage (de *utility ratio*) van de machines in overweging neemt. Concreet betekent dit dat wanneer een schip sneller geladen of gelost wordt, de productiviteit van deze haven stijgt. Het is belangrijk voor havens om manieren te vinden om containers op een zo efficiënt mogelijke manier te stapelen. Zowel om de behandelingstijden van de schepen te kunnen verkleinen als om hun capaciteit te vergroten om containers te stockeren. Een meer uitgebreide bespreking van de productiviteit van container terminals volgt bij de literatuurstudie.

Wanneer havens hun productiviteit en efficiëntie niet kunnen verhogen, bestaat de mogelijkheid dat meer schepen naar andere havens zullen varen. Deze andere havens kunnen de schepen dan sneller en dus beterkoop verwerken. Deze daling in het aantal te verwerken schepen heeft een negatief effect op de economie van het land waar deze haven gelegen is. Concreet betekent dit dat wanneer de Belgische havens hun opslagruimte niet efficiënt benutten, dit een nefast effect kan hebben op de Belgische economie in zijn geheel.

## **1.2. Praktische relevantie**

Door de centrale ligging in Europa is België een goede uitvalsbasis voor bedrijven om producten van hieruit te transporteren naar de rest van Europa. De producten die aankomen in de havens (zoals de haven van Antwerpen of Zeebrugge) worden verder verdeeld naar andere terminals dieper in het hinterland (zoals o.a. de container terminal van Genk) of via vrachtwagens verdeeld naar distributiecentra. Dit transport zorgt voor tewerkstelling in zowel Vlaanderen als Wallonië. Het is daarom belangrijk dat de havens in Vlaanderen competitief blijven ten opzichte van hun concurrenten.

De aanwezigheid van de haven van Antwerpen is erg belangrijk voor de Belgische economie, want deze haven is een wereldspeler op het gebied van internationale maritieme trafiek. Op de website van de haven van Antwerpen staat vermeld dat men momenteel op dit gebied de tweede haven van Europa en de tiende van de wereld is.

In verschillende artikels zoals Steenken et al. (2004) en Dam Le-Griffin & Murphy (2006) wordt een vergelijking gemaakt tussen de tien grootste zeehavens ter wereld. De haven van Antwerpen is er daar één van, naast andere gevestigde waarden zoals Hamburg, Rotterdam, Los Angeles, Hong Kong etc. Het is dus essentieel voor de economie en de inwoners van België dat de haven van Antwerpen zijn plaats in de top van de zeehavens weet te behouden of eventueel zelfs weet te verbeteren.

De haven van Genk is een belangrijke container terminal die in verbinding staat met zowel de haven van Antwerpen als de haven van Rotterdam. Uit het verslag van Buck Consulting International (2007) blijkt dat deze container terminal van groot economisch belang is voor Limburg. Dit omwille van het feit dat deze terminal een voordeel betekent voor de Limburgse bedrijven. De haven van Genk is een troef die de provincie uitspeelt om nieuwe bedrijven naar Limburg te halen om zo werkgelegenheid te creëren.

### **1.3. Probleemeigenaar en andere betrokkenen**

Zoals uit bovenstaande paragraaf blijkt is de probleemeigenaar de haven, iets specifieker 'de container terminal van de haven waar containers verwerkt en gestockeerd moeten worden'. Deze specificatie is nodig want er zijn ook andere delen van de haven die geen containerschepen verwerken en dus geen probleem ondervinden van de stijgende trend van het containerverkeer. Een voorbeeld van een onderdeel van een haven dat niet met containers werkt is terug te vinden op de website van de haven van Oostende, nl. de bulk kaaien in de haven van Oostende waar zand gestockeerd wordt. Dit zand wordt los getransporteerd, niet in containers.

De overige partijen die betrokken zijn bij dit probleem zijn erg divers. Deze gaan van de havenarbeiders tot de Belgische Staat. In bovenstaande paragraaf is reeds aangegeven dat de Belgische economie schade kan ondervinden van de achteruitgang van het aantal te verwerken schepen in de havens. Hiernaast zijn de bedrijven in België die hun producten willen verschepen via Belgische havens ook betrokken partij. Deze ondervinden op twee manieren nadeel van dit probleem. Ten eerste is er de kost voor het verwerken van hun schepen die hoger zal liggen omwille van de inefficiënte werking van de haven. Ten tweede zullen andere bedrijven hun schepen wel naar andere havens laten varen. Bij deze andere bedrijven kunnen leveranciers zitten van het bedrijf in kwestie. De transportkosten om aan de nodige producten of grondstoffen te geraken zullen stijgen aangezien men deze moet transporteren vanuit een andere haven die verder gelegen is.

Door het feit dat zowel de bedrijven in België als de havens zelf hinder zullen ondervinden van het niet aanpassen van de efficiëntie van de havens, ondervinden de werknemers van deze twee betrokken partijen ook een negatieve invloed van dit probleem. Zij kunnen hun job verliezen of te maken krijgen met een slechter presterende Belgische economie.



## Hoofdstuk 2: Onderzoeksvragen

### 2.1. Centrale onderzoeksvraag

De centrale onderzoeksvraag waarop in deze masterproef een antwoord geformuleerd wordt, luidt als volgt: *"Hoe kunnen container terminals de opslag van containers efficiënter maken om zo de productiviteit te verbeteren?"*. Om deze centrale onderzoeksvraag goed te kunnen beantwoorden, wordt deze opgesplitst in meerdere deelvragen.

### 2.2. Deelvragen

De centrale onderzoeksvraag kan opgesplitst worden in twee grote delen: het verbeteren van de productiviteit van een container terminal en het efficiënter maken van de opslag van containers. De eerste deelvraag in deze masterproef heeft betrekking op de factoren die de productiviteit beïnvloeden: *"Welke zijn de factoren die de productiviteit van een container terminal beïnvloeden en hoe kunnen deze verbeterd worden?"*.

Bij de tweede deelvraag wordt gekeken naar de manieren waarop men containers kan stockeren in een container terminal. In de literatuur bestaan verschillende modellen om containers op te slaan en deze zullen in eerste fase uitgelegd worden. *"Welke soorten modellen zijn weergegeven in de literatuur omtrent het opslaan van containers?"*.

Uit deze opsomming van modellen wordt een keuze gemaakt om één of meerdere modellen na te bouwen in deze masterproef. Concreet wordt er bij de derde deelvraag een antwoord gezocht op de vraag: *"Welke modellen komen in aanmerking om nagebouwd te worden en welk model/welke modellen worden uiteindelijk nagebouwd?"*.

Nadat een antwoord geformuleerd is op de bovenvermelde deelvragen, worden de bekomen resultaten bekeken en besproken. De uitwerking van de modellen is louter conceptueel en slaat niet terug op een gevalstudie uit de realiteit. De laatste deelvraag zal bijgevolg nagaan welke van de bekomen resultaten belangrijk zijn in de realiteit. Deelvraag vier luidt dus als volgt: *"Welk van de besproken resultaten zijn belangrijk voor de container terminal van Genk en wat zijn de gevolgen ervan op de dagelijkse werking van de haven?"*

Het vervolg van deze masterproef is opgebouwd als volgt. In hoofdstuk 3 wordt eerst een korte inleiding gegeven over het onderwerp om daarna een uitleg te geven over algemene begrippen die gebruikt worden in de literatuur omtrent containers en container terminals. Vervolgens wordt gekeken naar de verschillende delen waaruit een container terminal is opgebouwd. Na de bespreking van de verschillende delen van een terminal, wordt de apparatuur die gebruikt wordt toegelicht. In een volgend punt wordt bepaald hoe de productiviteit van een container terminal gemeten wordt en hoe deze te verbeteren. Vervolgens wordt er ook stilgestaan bij het begrip *re-stacking*, dat reeds aan bod is gekomen.

In hoofdstuk 4 wordt onderzocht welke modellen bestaan om de opslag van containers te optimaliseren en deze worden in categorieën onderverdeeld. Na deze bespreking wordt een keuze gemaakt van de modellen die nagebouwd worden. Hoofdstuk 5 bevat de bespreking, uitwerking en bijhorende resultaten van beide modellen. Het laatste hoofdstuk in deze masterproef bevat de conclusies en opmerkingen omtrent dit onderwerp.

## Hoofdstuk 3: Literatuurstudie

### 3.1. Inleiding

Gedurende de afgelopen twintig jaar is een stijging merkbaar in het aantal geschreven artikels over het optimaliseren van de logistieke activiteiten op een container terminal. Deze stijging geeft de waarde weer van deze activiteiten. De literatuur evolueert van meer theoretische publicaties naar meer praktijkgerichte onderzoeken om de werking van een container terminal te optimaliseren. Men tracht niet de totale transportketen te optimaliseren, want deze is te complex. Wel probeert men deze transportketen op te splitsen in verschillende kleinere delen en focust men zich op het optimaliseren hiervan (Steenken et al., 2004).

### 3.2. Containers

In Steenken et al. (2004) definieert men containers als 'relatief uniforme kisten die de inhoud ervan beschermen tegen weersomstandigheden en diefstal'. Een andere definitie die Vis en de Koster (2003) hanteren luidt als volgt: 'containers zijn grote dozen die worden gebruikt om goederen te transporteren van de ene bestemming naar de andere.'

Er zijn verschillende types van containers, maar de meest gebruikte zijn deze met een lengte van 20 feet, een zestal meter. Dit is de standaardlengte van een container en andere lengtes van containers worden vergeleken met deze referentielengte. Bijvoorbeeld wanneer een container twee keer zo lang is als de standaardlengte spreekt men van 2 TEU, dit is de afkorting van *twenty feet equivalent units* (Steenken et al., 2004; Vis & de Koster, 2003). Deze afkorting wordt consequent gebruikt in de literatuur.

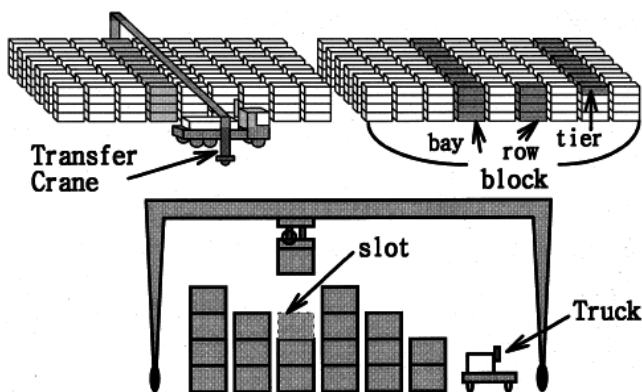
Het transport van goederen wordt vergemakkelijkt door het feit dat de vorm van hetgeen getransporteerd moet worden gestandaardiseerd is. Door het uniforme karakter van de vorm van de containers wordt het stapelen vergemakkelijkt. Zo kunnen meer producten getransporteerd worden omdat men minder open ruimte heeft tussen de verschillende componenten die men vervoert. De inhoud van de containers moet niet uitgepakt worden op elk punt van de route, waardoor tijdwinst ontstaat (Steenken et al., 2004). Nog andere voordelen zijn minder productverpakking en minder schade aan de goederen (Vis & de Koster, 2003). Deze voordelen zorgen ervoor dat per keer meer volume kan vervoerd worden waardoor men tijd en kosten bespaart en dus de productiviteit verhoogt.

### 3.3. Container terminal

#### 3.3.1. Definities van een container terminal

Ook al verschillen zeehavens container terminals sterk op vlak van grootte, functie en geometrische lay-out, ze bevatten allemaal dezelfde subsystemen (Günther & Kim, 2006). Een container terminal bestaat uit verschillende blokken van containers waar containers worden opgeslagen (Nishimura, Imai, Janssens, & Papadimitriou, 2009). Kim, Park, en Ryu (2000), Steenken et al. (2004) en Zhang, Liu, Wan, Murty, en Linn (2003) geven een iets specifiekere uitleg en verklaren dat er gemiddeld tussen de twintig en de dertig *yard-bays* zijn per blok of per stapel, dit zijn het aantal rijen in de lengte van de stapel. Elk van deze *yard-bays* bevatten meestal zes rijen in de breedte, ook wel *rows* genoemd. Het aantal containers die op elkaar gestapeld zijn, noemt men *tier*.

De hoogte van deze stapelrijen wordt besproken door Steenken et al. (2004), Vis en de Koster (2003) en Zhang et al. (2003). Deze varieert tussen 2 en 8 containers, maar meestal wordt vier aangegeven als meest gebruikte hoogte. Dit aantal is echter afhankelijk van welke kranen men ter beschikking heeft.. Niet enkel de stapelhoogte, maar ook de lengte van de stapel is afhankelijk van deze factor (Zhang et al., 2003). De plaats van de container wordt dus weergegeven door de *bay*, de *row* en de *tier* binnen een blok (Günther & Kim, 2006; Steenken et al., 2004). Op onderstaande afbeelding is de opbouw van een container blok zichtbaar.



**Afbeelding 1: Een container blok met een transferkraan (Kim et al., 2000)**

Naast deze basisdefinitie van een terminal leggen andere auteurs meer nadruk op de functie van een container terminal. Zo is volgens Dam Le-Griffin en Murphy (2006) de basisfunctie van een container terminal de transfer en opslag van containers. Er wordt hier ook gesproken over transfer en niet meer enkel over opslag van containers. De reden hiervoor is dat haven terminals knooppunten zijn in een globaal systeem van transport via land en zee. Günther en Kim (2006) geven aan dat container



terminals een interface zijn tussen verschillende transportmodi, zoals transport per spoor, per vrachtwagen en per schip. Zhang et al. (2003) geven ook aan dat een container terminal naast het laden en lossen van containers ook een opslagfunctie heeft.

Steenken et al. (2004) stellen iets gelijkaardigs want men beschrijft een container terminal als 'een open systeem van materiaalstromen met twee externe interfaces. Deze interfaces zijn de kaaizijde met het laden en lossen van de schepen en de landzijde waar de containers geladen en gelost worden van vrachtwagen, treinen of nog andere transportmodi.' Containers kunnen dus aankomen in container terminals zowel via het water als via het land.

Een container terminal wordt opgesplitst in verschillende delen. Vaak gebeurt deze opsplitsing in twee delen, nl. een import- en een exportgebied. Zoals de naam aangeeft komen de containers die van de schepen gelost worden terecht in het importgebied van de terminal, deze worden importcontainers genoemd. De containers die geladen moeten worden op het schip zijn gestockeerd in het exportgebied en deze worden exportcontainers genoemd. Naast deze twee gebieden kan de terminal ook nog eventueel opgesplitst worden in een gebied waar lege containers geplaatst worden. Er kunnen zelfs speciaal gereserveerde stapels zijn voor speciale containers, zoals containers die gevaarlijke stoffen bevatten of containers die niet geschikt zijn voor normale opslag (Steenken et al., 2004). Nishimura et al. (2009) voegen hier nog aan toe dat containers voor één bepaald schip behandeld worden als een container groep en dus ook als groep worden gestockeerd in een container blok, voor zover dit mogelijk is.

Een andere definitie van een container terminal is afkomstig uit Günther en Kim (2006) en luidt als volgt: 'een container terminal een complex systeem is met veel dynamische interacties tussen de verschillende behandelings-, transport- en opslagunits waar er een onvolledige kennis is van toekomstige gebeurtenissen.'

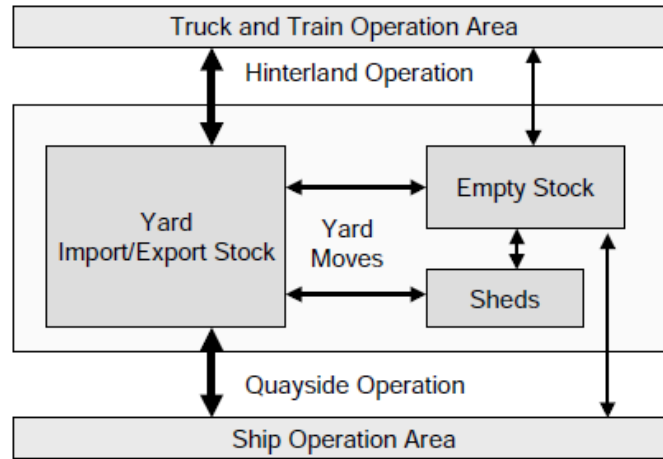
### **3.3.2. Werking van een container terminal**

In Dekker et al. (2007), Vis en de Koster (2003) en Steenken et al. (2004) wordt de werking van zeehavens besproken. Bij aankomst in de haven meren zeeschepen aan bij een op voorhand vastgelegde ligplaats. Deze ligplaatsen zijn uitgerust met kaaikranen die de vervoerde containers uit het schip halen en nieuwe containers in het schip laden. Deze containers worden getransporteerd van en naar de *main stack*, de opslagplaats voor containers binnen de container terminal. Dit transport kan gebeuren via kranen of via voertuigen die in de literatuur *straddle carriers*<sup>1</sup> genoemd worden. De containers gaat men zo dicht mogelijk proberen op te slaan bij de plaats waar ze overgeladen zullen worden. Vanuit hun opslagplaats kunnen de containers ofwel opnieuw overgeladen worden op een

---

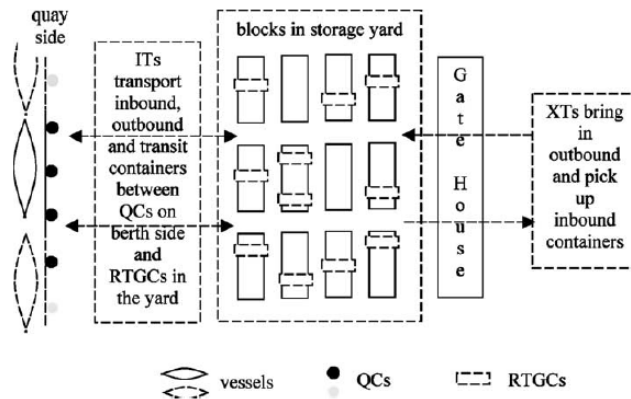
<sup>1</sup> Een voorbeeld van een *straddle carrier*, ook wel loopwagen genoemd, wordt weergegeven door afbeelding 7.

zeeschip ofwel op een vervoermiddel van één van de drie volgende transportmodi, nl. op vrachtwagens, treinen of binnenschepen. Een schematische voorstelling van een container terminal wordt gegeven in onderstaande afbeelding.



**Afbeelding 2: Schematische voorstelling van een container terminal van een zeehaven (Steenken et al. 2004)**

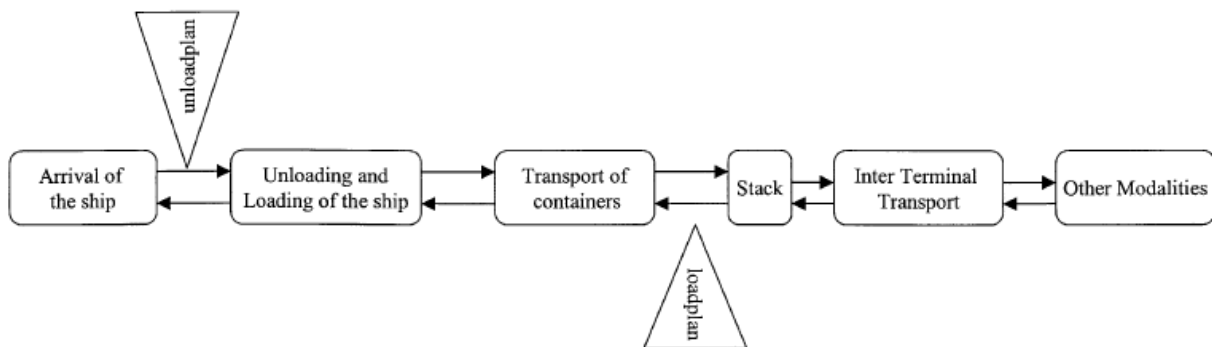
Günther en Kim (2006) beschrijven de werking van een container terminal in de andere richting, beginnend bij de container die binnenkomt via vrachtwagens en/of het spoor en eindigend bij het laden van het schip. De beschrijving komt grotendeels overeen met hetgeen beschreven staat in de bovenstaande alinea, mits enkele bemerkingsen. Zo wordt de container vanaf het moment van aankomst in de terminal geïdentificeerd en geregistreerd. Data die hierbij gebruikt worden zijn inhoud, afkomst, bestemming, gewicht, etc.



**Afbeelding 3: Een schematische voorstelling van een container terminal (Zhang et al., 2003)**

Een iets meer praktijkgerichte schematische voorstelling van een terminal is gegeven door bovenstaande afbeelding uit Zhang et al. (2003). Hier zijn de verschillende onderdelen van een terminal al zichtbaar. De terminal wordt in dit artikel onderverdeeld in twee delen, nl. de kaaizijde waar de schepen aanmeren en het opslagterrein waar de containers gestockeerd worden. In dit artikel geeft men ook aan dat er op voorhand al informatie gekend moet zijn om de opslag van containers in goede banen te leiden. Men moet weten wanneer een schip aan zal meren en op welke ligplaats dat zal gebeuren. Verder moet men informatie hebben over het aantal containers dat moeten gelost worden en eventueel welke containers moeten geladen worden.

In Steenken et al. (2004) wordt aangegeven dat de werkzaamheden aan de kaaien en het containertransport tussen de kaai en de opslagplaats ook wel het *waterside transshipment process* wordt genoemd in andere literatuur. Gelijkaardig bestaan ook de termen *hinterland transshipment process* en *landside transshipment process*. De processen die plaatsvinden op een container terminal worden besproken in Vis en de Koster (2003) en worden weergegeven in onderstaande afbeelding.



**Afbeelding 4: Processen in een container terminal (Vis & de Koster, 2003)**

De blokken geven de processen weer, de driehoeken de plannen die nodig zijn om deze processen te kunnen uitvoeren. Wanneer het schip aanmeert aan de op voorhand toegewezen kaai, moeten de gegevens van het losplan gekend zijn bij het havenpersoneel. Dit losplan bevat gegevens over welke containers uit het schip moeten gehaald worden en op welke plaats deze containers gestockeerd zijn in het schip. Deze containers worden dan uit het schip gehaald, getransporteerd naar de opslagplaats. Het laadplan van een schip is nodig tijdens het transporteren van de containers van de opslagplaats naar het schip. In dit laadplan staat welke containers in het schip moeten geplaatst worden (Vis & de Koster, 2003). Er zijn verschillende processen, maar in deze masterproef wordt vooral stil gestaan bij het stockeren van de containers.

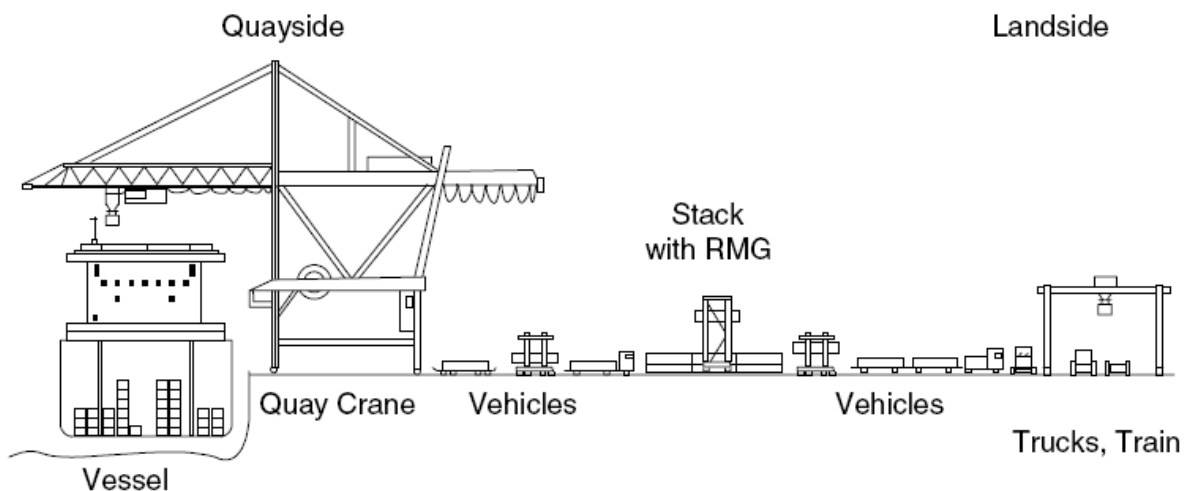
In Nishimura et al. (2009) worden verschillende redenen besproken waarom containers moeten worden opgeslagen in een container terminal. De eerste reden die wordt aangehaald zijn de tijdsverschillen tussen de aankomsttijden van verschillende schepen. Een andere reden is dat men

containers soms moet herschikken in het ruim van het schip. Tenslotte is er opslag van containers nodig wanneer de volgorde van containerbehandeling verschilt van de volgorde van opslag in het ruim van het schip.

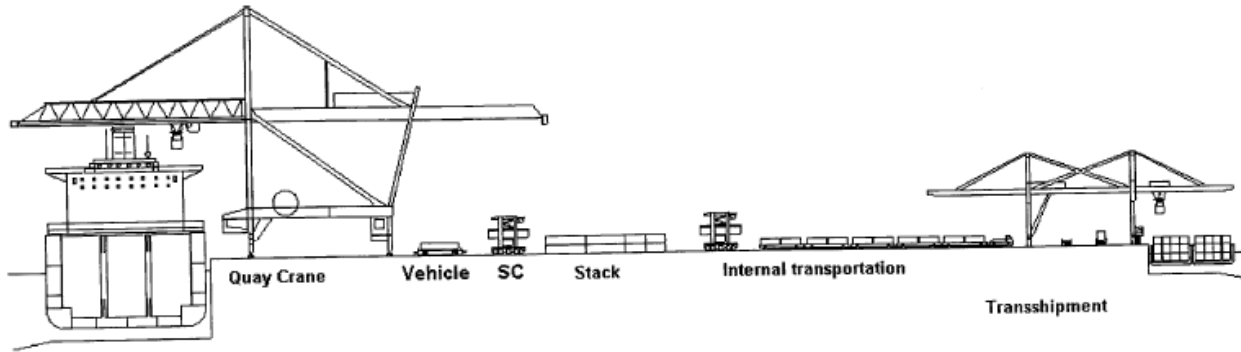
De meeste terminals werken nog steeds manueel, wat betekent dat werknemers van de haven de kranen en de voertuigen moeten besturen. Enkele terminals zoals deze in Rotterdam, Hamburg en London werken semi-geautomatiseerd en maken gebruik van *automatic guided vehicles (AGV)* om containers te transporteren en *automatic stacking cranes (ASC)* om containers te stapelen (Dekker et al.,2007). Günther en Kim (2006) hebben reeds opgemerkt dat er een verschuiving was naar het gebruik van geautomatiseerde containerbehandelingen en transporttechnologie. Zij merkten op dat dit vooral voorkomt in landen met een hoge arbeidskost. Het nadeel bij het gebruik van deze automatische apparatuur is het feit dat er extra complexiteit komt bij de logistieke controle binnen de werking van een haven. Liu, Jula, & Ioannou (2002) hebben wel opgemerkt dat de prestaties en kosten van conventionele terminals substantieel kunnen verbeterd worden door gebruik te maken van automatisatie.

### 3.3.3. Opbouw van een container terminal

Op onderstaande afbeeldingen 5 en 6 wordt een duidelijk beeld gegeven hoe een container terminal is opgebouwd. De eerste afbeelding geeft een beeld van de weg die de containers afleggen van het schip tot de transportmodi die de containers landinwaarts zullen brengen. De tweede afbeelding daarentegen geeft een beeld van het laden en lossen van schepen.



**Afbeelding 5: Opbouw van een container terminal in een haven (Steenken et al., 2004)**



**Afbeelding 6: Het proces van het laden en lossen van een schip (Vis & de Koster, 2003)**

In beide afbeeldingen is duidelijk te zien dat in een container terminal gebruik gemaakt wordt van dezelfde bouwstenen:

- Kaaikranen
- Voertuigen en kranen om de containers te verplaatsen in de container terminal, zowel tussen het schip en de opslagplaats als tussen de opslagplaats en de transportmodi
- Een opslagplaats voor containers
- Een terminal waar de containers geladen kunnen worden op de transportmodi

De apparatuur die gebruikt wordt in container terminals wordt in meer detail besproken in paragraaf 3.3.6. in deze literatuurstudie.

### **3.3.4. Verschillende types van een container terminal**

De verschillende types van container terminals worden gebaseerd op basis van welke apparatuur gebruikt wordt om de containers te behandelen. Volgens Steenken et al. (2004) kan voornamelijk een opsplitsing gemaakt worden in twee belangrijke types: systemen die enkel gebruik maken van *straddle carriers*, ook wel loopwagens<sup>2</sup> genoemd, en systemen die gebruik maken van *gantry cranes*, ook wel portaalkranen genoemd, om containers op te slaan. Onderstaande afbeeldingen geven respectievelijk een *straddle carrier* en een *gantry crane* weer.

---

<sup>2</sup> In de Haven van Antwerpen worden deze *straddle carriers* ook 'olifanten' genoemd door het personeel.



**Afbeelding 7: Een straddle carrier – loopwagen (Steenken et al., 2004)**



**Afbeelding 8: Een (rubber-tired) gantry crane – portaalkraan  
(<http://www.gantry-crane.org/tag/used-gantry-cranes/>)**

In Steenken et al. (2004) en Henesey (2006) wordt nog een derde categorie vermeld, het *on-chassis* systeem, dat voornamelijk voorkomt in Noord-Amerika. Dit systeem maakt geen gebruik van speciale kranen voor de opslag van containers. Een ander kenmerk van dit type terminal is dat de logistieke handelingen om containers te stapelen eenvoudiger zijn dan bij de andere types. Een derde kenmerk is het feit dat meer plaats nodig is om de containers te stockeren, aangezien ze nu apart worden geplaatst en niet meer op elkaar. Vis en de Koster (2003) geven aan dat alle containers individueel toegankelijk zijn omwille van het feit dat de containers niet op elkaar worden gestapeld, maar op een chassis. Deze manier van containeropslag komt niet veel voor omdat men te maken heeft met gelimiteerde opslagruimtes.

### **3.3.5. Plannings- en controle niveaus gebruikt bij container terminals**

In Vis en de Koster (2003) bespreken ze drie plannings- en controle niveaus om beslissingen te nemen in een terminal. Deze drie niveaus zijn: het strategische niveau, het tactische niveau en het operationele niveau.

Op het strategische niveau worden beslissingen genomen in verband met welke apparatuur er gebruikt zal worden en welke lay-out de container terminal moet hebben. Op dit niveau wordt voornamelijk gewerkt met een visie op lange termijn. Deze beslissingen vormen beperkingen voor de twee andere niveaus. Op het tactische niveau worden beslissingen genomen die te maken hebben met welke soort informatie er gebruikt moet worden en welke brede keuzes er nog moeten gemaakt worden. Tenslotte worden op het derde en laagste niveau, het operationele niveau, alle dagelijkse beslissingen genomen die nodig zijn om de keuzes op de twee andere niveaus uit te werken.

In Steenken et al. (2004) komen deze drie niveaus terug, maar dan in de context van simulatiesystemen. Op elk van de voornoemde niveaus wordt gebruik gemaakt van simulaties om de handelingen en de resultaten van de haven te kunnen verbeteren. Het simulatiemodel dat in deze masterproef wordt uitgewerkt maakt deel uit van het operationele niveau omdat optimalisatiemethodes bestudeerd worden die zouden toegepast kunnen worden op de terminal.

Om het verschil tussen deze niveaus beter te begrijpen is het handig om volgend voorbeeld te bekijken. Op het strategische niveau worden beslissingen genomen zoals 'Welke lay-out moet de terminal hebben?', 'Welke soort kranen gaan we gebruiken?' en 'Werken we met geautomatiseerde transportmodi of niet?'. Dit zijn de beslissingen die *top level* genomen moeten worden. Als men hier een beslissing heeft genomen moet men op een lager niveau zorgen voor de verdere uitwerking ervan. Bij het tactische niveau wordt bijvoorbeeld bepaald hoeveel van de gekozen kranen er moeten aangekocht worden om efficiënt te kunnen werken. Op het operationele niveau moeten dan dagelijks antwoorden gezocht worden op vragen als: 'Er zijn twee kranen nodig voor het schip dat aangemeerd is te lossen en er staan drie kranen vrij. Welke twee kranen moeten er toegewezen worden aan deze opdracht?'.  
  
**3.3.6. Apparatuur gebruikt in container terminals**

De apparatuur die in terminals gebruikt wordt, kan onderverdeeld worden in twee componenten, nl. voorraden en transportvoertuigen (Steenken et al., 2004). Bij voorraden horen de containers, de schepen, de treinen en de vrachtwagens. De kranen en de interne transportmodi behoren tot de andere categorie.

De beslissing over welke apparatuur wordt gebruikt in terminals, is afhankelijk van verschillende factoren zoals ruimtelijke, economische en historische beperkingen. Vooral de beschikbaarheid van ruimte is een belangrijke factor. Wanneer de ruimte beperkt is, krijgen *gantry cranes* de voorkeur. In landen waar de arbeidskost hoog is, zal eerder gebruik gemaakt worden van AGV's en automatische *gantry cranes*. Historische en culturele redenen moeten mee in overweging genomen worden bij de herinrichting of vernieuwing van de terminal (Steenken et al., 2004). De keuze die uiteindelijk gemaakt wordt omtrent welk materiaal er gebruikt wordt in de terminal, heeft gevolgen voor de prestaties van de container terminal (Henesey, 2006).

### 3.3.6.1. Kranen

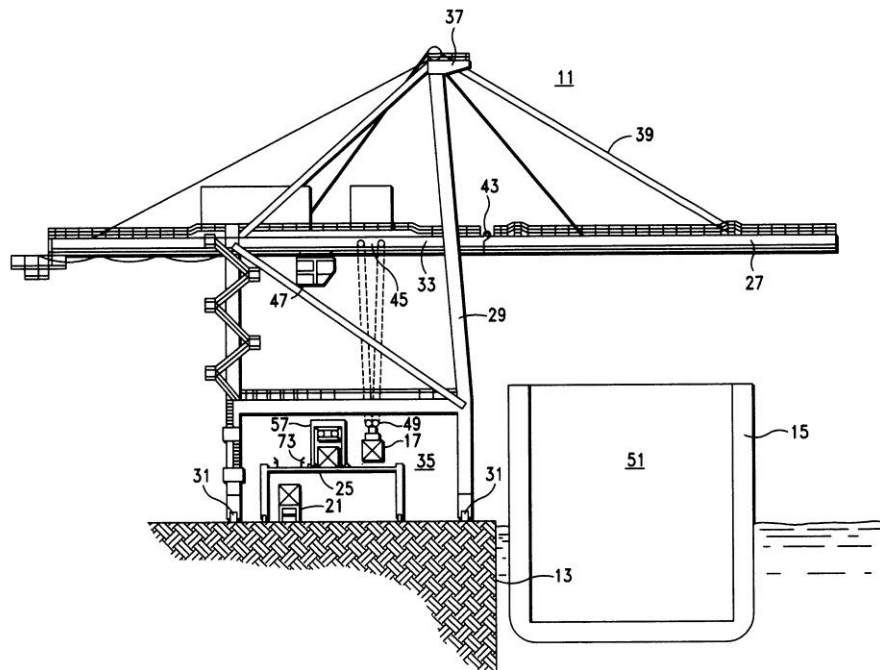
Er zijn verschillende soorten kranen die gebruikt worden binnen een container terminal. Hieronder volgt een opsomming en bespreking van de meest voorkomende types van kranen.

Een eerste soort van kranen die besproken wordt in de literatuur zijn kaaikranen, dewelke gebruikt worden voor het laden en lossen van schepen. Er wordt een opsplitsing gemaakt tussen *single-trolley* kranen en *dual-trolley* kranen (Steenken et al., 2004; Vis & de Koster, 2003; Günther & Kim, 2006). Deze *trolleys* bewegen over de arm van de kraan en zijn uitgerust met *spreaders*. Dit zijn speciale hulpmiddelen die containers kunnen oppakken. Nieuwe *spreaders* maken het mogelijk om twee TEU containers tegelijkertijd te behandelen, dit wordt de *twin-lift* methode genoemd.

Gewoonlijk wordt gewerkt met *single-trolley* kranen die de containers van het schip naar de opslagplaats vervoeren of eventueel eerst op de kaai of op een interne transportmodus plaatsen. Ook in de omgekeerde richting wordt gebruik gemaakt van deze kranen. Deze *single-trolley* kranen kunnen enkel functioneren met een bestuurder aan boord. *Dual-trolley* kranen daarentegen vormen een nieuwe ontwikkeling in de apparatuur die gebruikt wordt binnen container terminals. De hoofd *trolley* beweegt de container van het schip tot op een platform waar dan de tweede *trolley* deze container oppikt en aan wal stockeert. De hoofd *trolley* werkt ook nog via een bestuurder, maar de tweede *trolley* werkt automatisch. De bestuurders van nieuwe *single-trolley* kranen en nieuwe *dual-trolley* kranen worden wel geholpen met een semi-automatische besturing bij nieuwe kranen. Volgens Vis en de Koster (2003) is het niet mogelijk om de werking van deze kraan te automatiseren omwille van praktische problemen, zoals de exacte positie van de containers.

De maximum capaciteit van kaaikranen is afhankelijk van het type kraan, maar variëren tussen 22 en dertig containers per uur (Steenken et al., 2004). Belangrijk om te vermelden is het feit dat de *bottleneck* bij de handelingen in verband met het laden en lossen van containers ligt bij de kaaikranen. Men tracht ten allen tijde proberen deze kranen aan het werk te houden (Nishimura et al., 2009). Een schematisch voorbeeld en een reële weergave worden toegelicht op onderstaande afbeeldingen 9 en 10.





**Afbeelding 9: Een *single-trolley* kaaikraan (patenttekening)**  
(<http://www.freepatentsonline.com/6652211.html>)



**Afbeelding 10: Een *dual-trolley* kaaikraan (reële weergave) (Steenken et al., 2004)**

Een tweede soort van kranen die wordt besproken in Steenken et al. (2004), Günther en Kim (2006) en Kim et al. (2000) zijn de transferkranen die gebruikt worden om de containers te stapelen. Deze kranen nemen de containers af van interne transportmodi en plaatsen deze in de opslagplaats. Ook plaatsen zij de containers op externe transportmodi, nadat deze containers van de opslagplaats zijn

gehaald. Er wordt gebruik gemaakt van drie types kranen, nl. *rail mounted gantry cranes* (RMG), *rubber tired gantry cranes* (RTG) en *overhead bridge cranes* (OBC). Elk van deze kranen heeft zijn voor- en nadelen. Zo is de RMG stabiel, de RTG flexibeler en de OBC zijn gemonteerd op betonnen of stalen pilaren.

In Henesey (2006) worden de RMG en RTG kranen verder besproken. Zoals de naam al doet vermoeden beweegt een RMG over sporen. Het nadeel van deze kraan is het feit dat deze minder flexibel is omdat deze gebonden is aan de sporen en dus niet zomaar van de ene stapel naar de andere stapel kan vervoerd worden. Dit type kraan wordt gebruikt op grote container terminals zoals Hong Kong, Singapore en Rotterdam. Net omwille van het feit dat er in deze terminals grote volumes containers moeten worden behandeld, is het voordeliger om dit type kraan te gebruiken.

Operationeel bekeken is de RMG kraan niet erg verschillend van een RTG kraan, behalve het feit dat deze laatste flexibeler is en dus kan ingezet worden aan verschillende stapels. Deze kraan, die gebruikt wordt in de terminal van Oslo, rijdt rond op rubberen wielen en wordt vooral gebruikt in verticale verschuivingen van containers. Een nadeel aan het gebruik van een RTG kraan is het feit dat meer synchronisatie nodig is met ander apparatuur om congestie te vermijden in de haven.

Naast deze drie types van kranen is er in Steenken et al. (2004) ook sprake van een nieuwe ontwikkeling, nl. de dubbele RMG-systemen, die bestaat uit twee RMG's met verschillende hoogte en breedte. Deze twee kranen kunnen elkaar passeren zonder elkaar te hinderen waardoor ze een hogere productiviteit behalen. Een voorbeeld van een dubbel RMG is te zien op onderstaande afbeelding.



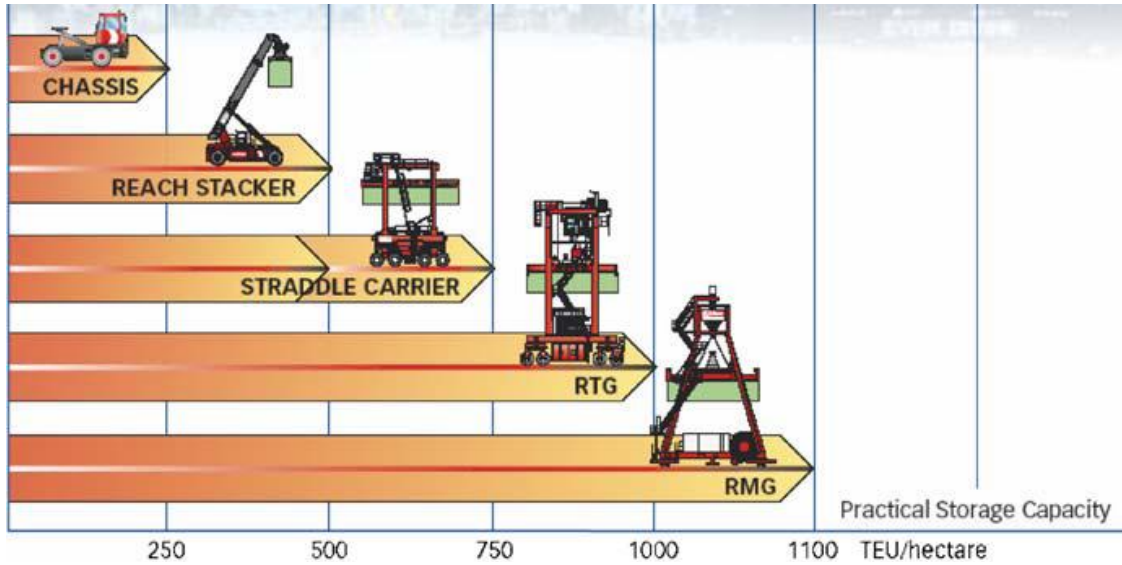
**Afbeelding 11: Een stacking crane, met name een *Double-RMG* (Steenken et al., 2004)**

De meeste *gantry cranes* kunnen tussen acht en twaalf rijen overspannen, terwijl deze kranen tussen vier en tien containers op elkaar kunnen plaatsen. De capaciteit van deze verschillende soorten *gantry cranes* is ongeveer twintig bewegingen per uur. Om de handelingen van de kranen redundant te maken en dus operationele onderbrekingen te vermijden bij technische faling, worden vaak twee kranen handeling toegewezen aan een stapel containers (Steenken et al., 2004). Het gebruik van deze transferkranen is volgens Nishimura et al. (2009) één van de meest populaire methoden om containers te stapelen, omdat deze hogere stapels kunnen vormen en verwerken.

In het algemeen worden *gantry cranes* bestuurd door mensen, al zijn er nieuwe modellen die automatisch kunnen handelen. Deze automatische modellen, die *automatic stacking cranes* (ASC) worden genoemd, worden gebruikt in sommige terminals zoals Rotterdam, Londen en Hamburg volgens Vis en de Koster (2003) en Steenken et al. (2004). In deze terminals gebruiken ze ook ander geautomatiseerd materiaal, zoals *automatic guided vehicles* (AGV).

Naast deze twee types van kranen kan zoals reeds vermeld ook gewerkt worden met *straddle carriers*. In Henesey (2006) wordt een *straddle carrier* beschreven als een machine die twee taken combineert, zowel het horizontaal als het verticaal stockeren van containers. De capaciteit van deze *straddle carrier* om containers te stapelen varieert tussen twee en vijf containers. Het werken met *straddle carriers* heeft twee voordelen, nl. het feit dat deze machines op elke locatie binnen de container terminal kunnen operatief zijn. Het andere voordeel is het feit dat containers onmiddellijk onder *gantry cranes* kunnen geplaatst worden zonder dat deze moeten wachten op de beweging van een kaaikraan. Dergelijke *straddle carriers* worden gebruikt in de Haven van Antwerpen. In Vis en de Koster (2003) en Steenken et al. (2004) worden *straddle carriers* behandeld als interne transportmodi omwille van het horizontale transport van de containers.

Vorkheftrucks en *reachstackers* kunnen ook bij beide indelingen geplaatst worden omdat ze zowel containers kunnen transporteren als stockeren. Deze machines worden vooral gebruikt voor het transport van één container (Vis & de Koster, 2003), met name om lichte en lege containers op externe transportmodi te plaatsen (Steenken et al., 2004). Op onderstaande afbeelding 12 worden de verschillende kranen weergegeven en vergeleken met elkaar op basis van hun praktische opslagcapaciteit.



**Afbeelding 12: Rangschikking van verschillende kranen op basis van hun praktische opslagcapaciteit (Günther & Kim, 2006)**

### 3.3.6.2. Interne transportmodi

Net zoals bij kranen zijn er verschillende transportmodi mogelijk om de containers te vervoeren binnen een container terminal. Er kan gewerkt worden met vrachtwagens met één of meerdere trailers en *automatic guided vehicles* (AGV) (Steenken et al., 2004).

De vrachtwagens die intern worden gebruikt voor het transport van containers maken gebruik van dezelfde banen als de RTG en vrachtwagens die van buiten de terminal afkomstig zijn. Door het feit dat veel verschillend verkeer dezelfde ruimte gebruikt, is het belangrijk om verkeersopstoppingen in een haven te vermijden. Het gebruik van vrachtwagens in terminals is voornamelijk terug te vinden in terminals in Noord-Amerika waar, zoals reeds aangehaald, containers op een chassis worden gestapeld (Henesey, 2006). Voor het transport van meerdere containers wordt er gebruik gemaakt van *multi-trailer* systemen (Vis & de Koster, 2003). Op onderstaande afbeelding 13 wordt een voorbeeld van een dergelijk systeem voorgesteld.



**Afbeelding 13: Een multi-trailer systeem (Vis & de Koster, 2003)**

*Automatic guided vehicles* zijn voertuigen die worden bestuurd door automatische controlesystemen en dus niet door havenpersoneel. Het gebruik van deze apparatuur heeft als voordeel dat de arbeidskost verlaagt wordt en dat de flexibiliteit toeneemt. Dit is vooral handig in havens die de klok rond operationeel zijn (Heneseey, 2006). Het nadeel is echter dat de initiële kost erg hoog is (Vis & de Koster, 2003). De capaciteit van een AGV varieert tussen één 40 ft. of 45 ft. container en twee 20 ft containers (Steenken et al., 2004).

De werking van een AGV kan als volgt worden uitgelegd. Deze voertuigen, die vaak gebruikt worden op geautomatiseerde terminals, volgen een voorafbepaald traject. Dit traject wordt bepaald door elektrische draden, die in de grond zijn ingebouwd, waardoor de exacte positie van het voertuig kan gecontroleerd worden. De voor- en achterkant van een AGV zijn uitgerust met infraroodsensoren die obstakels kunnen detecteren. De terminal wordt ingedeeld in verschillende kleinere gebieden. Wanneer een AGV een gebied binnenrijdt, claimt deze dit gebied en is geen andere AGV in het gebied toegelaten om aanrijdingen te vermijden. In het geval dat de AGV toch iets raakt, wordt onmiddellijk de motor uitgeschakeld (Vis & de Koster, 2003).



**Afbeelding 14: Een voorbeeld van een *automatic guided vehicle* (AGV)  
(Steenken et al., 2004)**

De bovenvermelde apparatuur wordt door Steenken et al. (2004) geklasseerd als één bepaald type transportmodi, nl. de 'passieve' voertuigen, omdat deze niet de mogelijkheid hebben om zelf containers op te tillen. Er moet telkens een kraan aan de pas komen om de containers te laden en te lossen van deze voertuigen. Een tweede type kan wel zelf containers optillen en ze vervolgens transporteren. Voorbeelden hiervan zijn *forklifts*, *reachstackers* en *straddle carriers*. Deze machines zijn reeds besproken bij de verschillende soorten kranen die aanwezig kunnen zijn op een container terminal.

In zowel Günther en Kim (2006) als in Vis en de Koster (2003) is er sprake van een nieuw soort AGV, nl. *de automated lifting vehicles* (ALV). Deze kunnen één container optillen en vervoeren zonder gebruik te maken van een kraan. Deze machines zijn voorlopig nog niet veel in gebruik. In Steenken et al. (2004) wordt aangegeven dat ALV een andere benaming is voor een *automated straddle carrier* (ASC). Deze machines kunnen hoogtes hebben die variëren tussen één en vier containers.

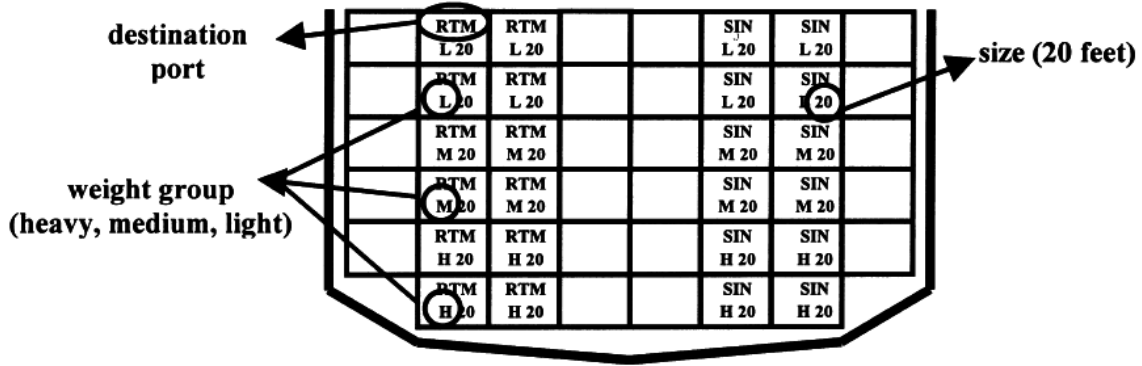
#### *3.3.6.3. Externe transportmodi*

Zoals reeds aangegeven worden de containers vervoerd van de container terminal naar het binnenland door binnenschepen, vrachtwagens en/of treinen. Vrachtwagens kunnen een capaciteit bevatten tussen één en drie TEU's. Treinen daarentegen kunnen tot 120 TEU's vervoeren per keer. Een manier van transporteren die aan belang wint, is het transport door *shuttle* treinen naar één specifieke bestemming in het hinterland. De precieze mix van externe transportmodi is erg afhankelijk van terminal tot terminal en heeft een invloed op de inrichting van de terminal en de gebruikte apparatuur (Steenken et al., 2004).

#### *3.3.6.4. Het laadplan*

In tegenstelling tot de vorige drie onderwerpen is het laadplan niet fysiek aanwezig op de container terminal, desondanks is dit een belangrijk hulpmiddel. Kim et al. (2000) geven aan dat het laden van schepen op voorhand wordt gepland door ladingsplanners. Het plannen zelf gebeurt een aantal dagen op voorhand door een medewerker van het containerschip. Deze stuurt een laadprofiel, een overzicht van het laadplan, door waar de containers worden gespecificeerd per containergroep. Op basis van het type van container (vol of leeg), de haven van bestemming en de grootte van de containers wordt bepaald in welke cel van het schip deze container gestapeld zal worden. Duinkerken, Evers en Ottjes (2001) benadrukken dat vooral het gewicht, de grootte en de bestemming van de container belangrijke factoren zijn die gegeven moeten worden via het laadplan.

Op onderstaande afbeelding 15 is een schematische voorstelling zichtbaar van dergelijke cellen in een schip met de nodige informatie.



**Afbeelding 15: Een voorbeeld van een ladingsprofiel in een containerschip  
(Kim et al., 2000)**

Verder zeggen Kim et al. (2000) dat ladingsplanners twee objectieven nastreven: het minimaliseren van de inspanningen die kranen en andere machines moeten leveren en de stabiliteit van het schip verzekeren. Het minimaliseren van de onnodige bewegingen van de kranen kan tot stand komen door opeenvolgende groepen van containers naast elkaar te plaatsen op de laadplaats, vooraleer ze te stapelen in het schip. Om de stabiliteit van een schip te garanderen worden zware containers op de bodem van het schip gestapeld.

### 3.4. Evaluatie van container terminals

Om een container terminal te evalueren wordt vooral gekeken naar twee objectieven, nl. de service van een terminal naar de rederijen toe en de productiviteit van de terminal (Zhang et al., 2003). Een meeteenheid voor de service van een terminal is de tijd die schepen doorbrengen aan de kaai in de haven (Zhang et al., 2003). In Steenken et al. (2004) wordt deze factor *transshipment time* genoemd. Zoals reeds eerder aangehaald moet deze tijd geminimaliseerd worden.

Om de productiviteit na te gaan van de terminal wordt gekeken naar de (gemiddelde) verwerkingscapaciteit, met andere woorden het aantal containers dat per jaar behandeld worden. (Zhang et al., 2003). Vaak gebeurt deze evaluatie door de bezettingsgraad van de gebruikte machines te onderzoeken. Wanneer de stroom van containers tussen de verschillende machines vlot verloopt, worden de containers op een minimale tijd behandeld. Vervolgens kunnen de machines ingezet worden bij andere schepen die geladen of gelost moeten worden, waardoor het aantal verwerkte containers per jaar stijgt. Belangrijk hierbij is de tijd dat machines niet gebruikt worden. Als men deze *idle time* kan verminderen, verbetert de bezettingsgraad en verhoogt de productiviteit van de haven (Steenken et al., 2004). Verder wordt in dit artikel aangegeven dat de containers op tijd en in de juiste volgorde moeten aankomen aan de kranen. Op deze manier wordt de behandelingstijd en de wachtrij aan de machines ingekort.

In onderstaande tabel 1 worden de meest gebruikte metingen van de productiviteit van terminals opgesomd.

Element of Terminal	Measure of Productivity	Measure
Crane	Crane Utilization	TEUs/year per Crane
	Crane Productivity	Moves per Crane-Hour
Berth	Berth Utilization	Vessels/year per Berth
	Service Time	Vessel Service Time (hrs.)
Yard	Land Utilization	TEUs/year per Gross Acre
	Storage Productivity	TEUs/Storage Acre
Gate	Gate Througput	Containers/hour/lane
	Truck Turnaround Time	Truck Time in Terminal
Gang	Labor Productivity	Number of Moves/man-hour

**Tabel 1: Meest gebruikte metingen van productiviteit  
(Dam Le-Griffin & Murphy, 2006)**

In Dam Le-Griffin en Murphy (2006) wordt een bespreking gegeven van factoren die de productiviteit meten. Men stelt in dit artikel dat de productiviteit beïnvloed wordt door interne en externe factoren. Interne factoren zijn factoren die de operator kan controleren zoals de indeling en de configuratie van de terminal, het geïnvesteerde kapitaal en de productiviteit van het havenpersoneel. Externe factoren daarentegen zijn niet controleerbaar voor de operator en enkele voorbeelden hiervan zijn het handelsvolume, de grootte en het type van schepen, het aankomstenpatroon van schepen, ...

Verder geven Dam Le-Griffin en Murphy (2006) aan dat vooral de capaciteit en efficiëntie van de poorten van de terminal, de uitwisselingspunten en rangeerstations de belangrijkste factoren die de productiviteit van een terminal beïnvloeden.

Andere criteria die gebruikt worden om de prestaties van een haven aan te geven worden opgesomd in Liu et al. (2002). Zo is er sprake van:

- *Throughput*: het aantal verplaatsingen per uur per kaaikraan, zowel in zijn geheel als per hectare;
- Verwerkingstijd per schip: de tijd dat het duurt om een schip te laden en te lossen;
- Verwerkingstijd per vrachtwagen: de gemiddelde tijd dat het duurt voor een vrachtwagen om een *gate* binnen te rijden, behandeld te worden en de *gate* terug buiten te rijden, zonder de tijd die gependend wordt aan het reële behandelen van de vrachtwagen;
- Gebruik van de *gate*: het percentage van de tijd dat een *gate* het inkomend en vertrekkend verkeer moet verwerken;
- *Container dwell time*: tijd die een container gemiddeld spendeert in de terminal vooraleer deze weggevoerd wordt.



Steenken et al. (2004) geeft enkele Europese cijfers weer voor sommige van deze factoren. Zo varieert de gemiddelde dagelijkse bezetting van grote container terminals tussen 15.000 en 20.000 containers. Dit resulteert in ongeveer 15.000 verplaatsingen per dag omdat niet elke container die gestockeerd is in de haven elke dag verplaatst moet worden. De gemiddelde *dwell time* van de containers varieert tussen drie en vijf dagen.

Andere factoren worden weergegeven door Duinkerken et al. (2001), zoals het herverplaatsingspercentage, de bezettingsgraad van de kranen zoals ASC's en kaaikranen en Tenslotte de gemiddelde verwerkingstijd van een container door een kraan.

Een derde objectief dat weergegeven wordt in Dam Le-Griffin en Murphy (2006), is het gebruik van de beschikbare grondruimte. Hierbij wordt gekeken naar het aantal containers die gestapeld worden in een bepaald gebied van de terminal. Wanneer de bezettingsgraad van de beschikbare ruimte verbetert, vermindert de toegankelijkheid tot de containers. Deze inverse relatie is afkomstig van het feit dat wanneer meer containers op elkaar gestapeld worden, er een grotere kans is dat containers geblokkeerd worden door andere containers.

### **3.5. Opslag van containers**

#### **3.5.1. Strategieën om containers te stapelen**

Vis en de Koster (2003) geven aan dat er twee manieren bestaan om containers te stapelen, nl. ofwel op een chassis ofwel op de grond. Als men containers stapelt op een chassis zijn alle containers individueel toegankelijk. Deze manier van stapelen is reeds kort besproken in deze masterproef en wordt niet verder uitgewerkt in deze paragraaf.

Bij het stapelen op de grond wordt in Duinkerken et al. (2001) een opsplitsing gemaakt tussen een stapelmethode en een stapelstrategie. Bij een stapelmethode wordt het blok waarin gestapeld wordt gekozen, waardoor ook de bijhorende kraan gekozen wordt. Dit kan op twee manieren, ofwel willekeurig ofwel wordt er op voorhand één of meerdere blokken toegewezen aan kaaikranen. Het enige criterium waaraan voldaan moet worden als men de containers willekeurig gaat toewijzen, is minimaal één plaats in de stapel die vrij is. De andere stapelmethode heeft als voorwaarde dat het ladingsplan gekend moet zijn voordat men begint te stapelen. Omwille van deze voorwaarde wordt deze methode in de praktijk vaak niet gekozen.

Een stapelstrategie daarentegen gaat bepalen hoe de containers worden gestapeld in de toegewezen blok. Deze twee keuzes worden niet tegelijkertijd genomen. In deze paper worden vier stapelstrategieën besproken.

De eerste strategie, *random*, heeft geen informatie nodig van een container- of ladingsplan en wijst de containers willekeurig toe aan een rij waar de maximale hoogte nog niet is bereikt. Voor de tweede strategie, die *levelling* wordt genoemd, heeft net zoals de eerste strategie geen extra informatie nodig via het ladingsplan, maar hierbij gaat men eerst alle onderste lagen van de stapel vullen vooraleer men containers op een hogere laag gaat plaatsen. Door het gebruik van deze strategie minimaliseert men de werkelijke stapelhoogte. Een derde strategie die ook geen extra informatie nodig heeft, draagt de naam '*Closest position*', waarbij men eerst de dichtstbijzijnde stapel vult tot de maximale stapelhoogte om vervolgens verder van de kaai weg te bewegen tot alle containers gestapeld zijn.

De vierde en belangrijkste strategie, '*Maximum remaining stack capacity (RSC)*', wordt volledig uitgewerkt in dit artikel. Hiervoor heeft men, indien mogelijk, informatie nodig in verband met de *load category*. Zo kan men de RSC minimaliseren door containers met eenzelfde of een hogere categorie bovenop elkaar te stapelen. De RSC wordt berekend als de maximale hoogte van een stapel vermindert met de huidige stapelhoogte, dit geeft het aantal vrije plaatsen weer in de desbetreffende stapel. Dit getal moet vermenigvuldigd worden met de categorienummer van de bovenste container van de stapel om een RSC waarde toe te kennen aan elke stapel. Om een container toe te wijzen aan een bepaalde stapel, wordt de RSC waarde berekend na de plaatsing van deze container. De stapel waarbij de vermindering van de RSC waarde het laagst is, wordt gekozen als stockageplaats van de container. De werking van deze strategie wordt verklaard aan de hand van een voorbeeld in Duinkerken et al. (2001).

Naast deze opsomming van strategieën om containers te stapelen op een efficiënte manier, wordt er in dit artikel ook een ideale stapelhoogte bepaald voor de gevalstudie. In dit artikel was de optimale stapelhoogte gelijk aan vijf containers. Dit aantal is gevonden door de data van de verschillende simulaties te plotten op een grafiek en deze met elkaar te vergelijken. De maximale stapelhoogte is één van de parameters die de grootste invloed heeft op de totale stockeringscapaciteit, want dit bepaalt de capaciteit van het stockeringsgebied bij een gegeven lengte en breedte. Kim en Kim (1999) geven aan dat wanneer enkel de breedte en niet de lengte van de stapelrijen vastligt, de stapelhoogte de lengte van de stapelrijen vermindert en dus ook de tijd om de containers te stockeren. Het nadeel hierbij is dat, door het meer op elkaar stapelen van containers, de kans op herverplaatsingen vergroot.

In Steenken et al. (2004) wordt geen model uitgewerkt maar geeft men wel een uitgebreide bespreking van welke manieren er bestaan om containers te stapelen. Zo bespreekt men een manier waarbij men containers gaat indelen in categorieën om ze vervolgens een plaats toe te kennen in de terminal. Het model werkt als volgt, eerst reserveert men een deel van het stockeringsgebied voor het volgende schip dat aankomt in de haven. Op voorhand heeft men reeds een verwachting betreffende het aantal import- en exportcontainers. Als ook de transportmodus geweten is waarmee de containers

vervoerd worden nadat ze gelost zijn van het schip, kan men de containers op basis van deze informatie opdelen en stockeren. Men stapelt zwaardere containers op lichtere containers van dezelfde categorie omdat men hierbij aanneemt dat de zwaarste containers eerst moeten geladen worden omwille van de stabiliteit van het schip.

Door het reserveren van een deel van het stockeringsgebied gaat men niet de volledige capaciteit ter beschikking hebben om containers te plaatsen. Dit is volgens dit artikel de reden waarom sommige terminals een alternatief model toepassen met de naam '*Scattered stacking*'. Bij dit model gaat men geen reservaties meer doen van het stockeringsgebied voor elk schip apart, maar voor een bepaalde ligplaats. Wanneer een schip aanmeert zal op dit ogenblik via een IT-systeem een goede locatie gezocht worden voor de containers binnen het gereserveerde gebied. Men stockeert hierbij containers van dezelfde categorie op elkaar. Dit model resulteert in minder herverplaatsingen en een hogere bezettingsgraad van het stockeringsgebied.

### **3.5.2. Re-stacking**

Het begrip *re-stacking* wordt in de literatuur ook vaak *rehandling* of *reshuffling* genoemd. *Re-stacking* is het verplaatsen van één of meer containers binnen een container terminal omdat deze een container blokkeren die men moet laden op een schip. Concreet betekent dit dat men eerst één of meerdere containers moet verplaatsen die gestapeld zijn op andere containers om zo aan een lager gelegen container te geraken. Dit brengt een verspilling van tijd en geld mee omdat men nu kostbare werkingstijd moet besteden aan een container die men niet nodig heeft. Het minimaliseren van het aantal te verplaatsen containers binnen de container terminal zelf, draagt bij tot een verhoging van de productiviteit (Steenken et al., 2004).

Volgens Duinkerken et al. (2001) zijn er twee soorten *re-stacking*, zowel reactief als pro-actief. Reactieve *re-stacking* is wanneer de bovenste container verplaatst moet worden omdat men een onderliggende nodig heeft, zoals in vorige alinea is beschreven. Pro-actieve *re-stacking* daarentegen is wanneer men tijdens de momenten waarop de kranen vrij zijn, containers gaat verplaatsen. Concreet betekent dit dat men anticipeert op mogelijke problemen in de toekomst. Deze twee soorten van *re-stacking* worden ook aangehaald in Sauri en Martin (2011).

Vis en de Koster (2003) geven aan dat het aantal *rehandles* stijgt als de containers hoger op elkaar worden gestapeld. Het voordeel is wel dat er minder opslagruimte op de grond moet gebruikt worden om hetzelfde aantal containers te stapelen. In Sauri en Martin (2011) komen dezelfde bevindingen voor als in Vis en de Koster (2003). Het aantal *rehandles* worden volgens Dekker et al. (2007) berekend als een percentage op het totaal aantal containers. Er wordt wel een opsplitsing gemaakt tussen import- en exportcontainers die moeten verplaatst worden.



## Hoofdstuk 4: Modellen voor de opslag van containers

### 4.1. Algemeen aanvaarde principes

Enkele algemeen aanvaarde principes in verband met ruimtelijke planning worden weergegeven in Kim et al. (2000). Zo mogen containers van verschillende groepen niet gemengd worden binnen dezelfde *yard-bay* omdat eenzelfde groep containers een hogere waarschijnlijkheid heeft om naast elkaar geplaatst te worden in het schip. Een ander principe is dat de *yard-bay* die toegewezen wordt aan een bepaald schip moet bestaan uit één of twee aan elkaar grenzende blokken die in de richting van de kraanbeweging opgesteld staan. Dit alles om de behandelingstijden door de kranen te verlagen.

### 4.2. Minimaliseren van de doorlooptijd

In de literatuur bestaan verschillende modellen om na te gaan hoe efficiënt de werking van een terminal is en hoe deze verbeterd kan worden. Deze modellen kunnen onderverdeeld worden in verschillende types. Zo zijn er modellen die enkel de tijd dat het schip doorbrengt in de haven trachten te minimaliseren. Een voorbeeld van dit soort modellen is terug te vinden in Kozan en Preston (1999). Hier wordt gebruikt van een genetisch algoritme om een goede schatting te vinden van de optimale oplossing om de tijd te verlagen die een schip doorbrengt in de haven. Men vergelijkt twee strategieën, *random* en *scheduled*, om containers zo te stapelen dat de tijd die nodig is om een schip te behandelen minimaal is. Ditzelfde model wordt ook gebruikt in Kozan en Preston (2001), mits enkele aanpassingen van bepaalde parameters. Het grootste verschil tussen het artikel uit 1999 en dit artikel is dat in dit artikel drie strategieën vergeleken worden met elkaar, nl. *FCFS*, *LCFS* en *random*.

Een ander model dat in deze eerste categorie van modellen past, staat beschreven in Kozan (2000). Het doel van deze paper is het minimaliseren van de doorlooptijd. Er wordt gekeken naar de verschillende combinaties die mogelijk zijn van de apparatuur in de terminal om deze doorlooptijd te minimaliseren. In tegenstelling tot de drie voorgaande modellen wordt er in Imai, Nishimura en Papadimitriou (2001) op een meer wiskundige manier te werk gegaan. De auteurs hebben in dit artikel een heuristische procedure uitgewerkt op basis van een Lagrange relaxatie van het origineel probleem dat de aanlegplaats toewijst aan de inkomende schepen. Dit wordt een *Berth Allocation Problem (BAP)* genoemd, een toewijzingsprobleem van de aanlegplaatsen. Er bestaan zowel statische als dynamische *BAP's*. Het doel hiervan is om de som van de wachttijd en de verwerkingstijd van de schepen te minimaliseren.

Nishimura et al. (2009) behandelen een *Container Storage Allocation Problem (CSAP)*, een toewijzingsprobleem voor plaatsen om containers op te slaan, waarvan het model gebaseerd is op het *BAP* uit Imai et al. (2001). Net als in het vorige model tracht de doelfunctie de tijd te minimaliseren dat een schip moet wachten vooraleer een aanlegplaats toegewezen te krijgen als de tijd die er nodig is om het schip te behandelen. Voorts wordt in Nishimura et al. (2009) ook gebruik gemaakt van een Lagrange relaxatie van het oorspronkelijke model.

Zhang et al. (2003) hebben ook een dergelijk toewijzingsprobleem voor plaatsen om containers op te slaan uitgewerkt, al werd bij dit model gebruik gemaakt van een rollende horizon benadering. Voor elke planningshorizon wordt het probleem in twee niveaus opgedeeld en elk niveau wordt geformuleerd als een wiskundig programmeringsmodel. Op het eerste niveau wordt het totaal aantal containers, dat in elke opslagblok wordt opgeslagen, verdeeld zodat voldaan wordt aan de verschillende types werkbelasting van de twee blokken. Op het tweede niveau wordt het aantal containers per schip bepaald dat geplaatst wordt per blok, om zo de totale afstand te minimaliseren van het transport van de containers tussen de opslagblokken en de aanlegkaai.

Kozan en Preston (2006) gebruikt drie manieren om de optimale opslagplaats te vinden, nl. een tabu search, een genetisch algoritme en een hybride model dat voort komt uit zowel de tabu search als het genetisch algoritme. Een container transfer model wordt geïntegreerd met een container plaatsingsmodel omdat beide modellen tegelijkertijd moeten geoptimaliseerd worden. Uit dit artikel blijkt dat het gebruik van een genetisch algoritme betere resultaten geeft voor dergelijke problemen. Voorts daalt de doorlooptijd wanneer de maximale stapelhoogte verlaagd wordt.

Een laatste model dat kan onderverdeeld worden bij deze categorie van modellen is het model dat wordt beschreven in Zeng en Yang (2009). Hierbij wordt de focus gelegd op de *makespan* van inkomende containers, dit is de tijd die nodig is om alle inkomende containers te behandelen. Men houdt in dit model ook rekening met de apparatuur die aanwezig is op de terminal. Aan de hand van een simulatiemodel tracht men een goede benadering van de optimale oplossing van dit model te bekomen.

### **4.3. Minimaliseren van de kosten**

Een andere categorie van modellen zijn deze die focussen op het minimaliseren van de kosten die verbonden zijn bij het behandelen en opslaan van containers. Een voorbeeld van een dergelijk model wordt beschreven in Chen en Chao (2004). In dit artikel wordt een *Storage Space Allocation Problem* onderzocht, echter niet via een wiskundig model maar via een tijd-ruimte netwerk model. Er wordt dus gewerkt met knooppunten en bogen die bepaalde knooppunten verbinden. Elk van deze bogen heeft een bepaalde kost die in rekening wordt genomen. Een ander verschilpunt met de bovenstaand besproken artikels is het feit dat dit model enkel export containers in beschouwing neemt. Dit houdt in

dat containers eerst worden opgeslagen vooraleer ze geplaatst worden op een schip dat hen vervoert naar een andere haven. Het doel van dit model is om de kosten hieromtrent te minimaliseren.

Een tweede model in deze categorie is opgesteld door Park, Choe, Kim en Ryu (2010) waarin men een online zoekalgoritme ontwikkelt om een bepaalde stapelmethode dynamisch aan te passen en te optimaliseren door continu nieuwe varianten van deze methode aan te maken en te evalueren. De plaats waar de volgende container moet gestockeerd worden, wordt bepaald door een formule waarbij men een bepaald gewicht geeft aan verschillende factoren. Enkele van deze factoren bevatten kosten zoals de kosten om de container te stapelen en erna weer terug te gaan halen. Andere factoren zijn verspilling van ruimte en het feit dat een container al dan niet een extra behandeling nodig heeft. Op deze manier wordt een bepaalde stapel als beste oplossing gekozen waar de container geplaatst wordt. Wel wordt in dit model ook rekening gehouden met tijden zoals wachttijden en vertragingen.

Omwille van het feit dat data omtrent kosten quasi onmogelijk te achterhalen is omdat de concurrentie tussen terminals onderling zo hoog is, wordt er in deze masterproef geen dergelijk model verder uitgewerkt.

#### **4.4. Minimaliseren van het aantal herverplaatsingen van containers**

Een derde soort model concentreert zich op het aantal herverplaatsingen die nodig zijn op een terminal en tracht dit aantal zo laag mogelijk te houden. Één van deze modellen wordt besproken in Kim en Kim (1999) waarbij men een formule aangeeft die de relatie weergeeft tussen herverplaatsingen en stapelhoogte. Men past deze formule toe op drie cases, nl. wanneer containers aan een constant tempo aankomen, wanneer de aankomst van containers een cyclisch patroon bevat en wanneer de containers op een onregelmatige manier aankomen in de terminal. Bij de eerste case bekomt men een uitdrukking om de optimale stapelhoogte te bekomen. Dit optimum kan gevonden worden door het totaal aantal importcontainers gedurende de lengte van de planningshorizon te delen door het totaal aantal vrije plaatsen in het stockeringsgebied.

In Kim et al. (2000) wordt gezocht naar een methodologie om containers op te slaan, rekening houdend met het gewicht van de container. Er wordt dus niet enkel gekeken naar de configuratie van de terminal, maar ook naar de gewichtverdeling. Er wordt zelfs een beslissingsboom opgesteld die bestaat uit de set van optimale oplossingen om *real time* beslissingen te ondersteunen.

In Han, Lee, Chew en Tan (2008) wordt een overslaghaven bekeken en een strategie gebruikt waarbij export- en overslagcontainers gegroepeerd worden volgens schip van bestemming. Dit alles om het aantal herverplaatsingen te minimaliseren. Voorts wordt ook gekeken naar de potentiële congestie van het verkeer op de terminal. Deze tracht men te minimaliseren door gebruik te maken van een hoog-laag werklast balanceringsprotocol (*high-low workload balancing protocol*). In dit artikel

wordt een gemengd integer programmeringsmodel geformuleerd om de opslagplaats van inkomende containers, het aantal inkomende containers en het minimaal aantal kranen die hiervoor nodig zijn te bepalen. Er wordt gebruik gemaakt van een heuristisch algoritme dat gebaseerd is op tabu search om het initiële patroon van de werf weer te geven. Om dit patroon te verbeteren introduceren ze een verbeteringsalgoritme totdat men de optimale of een aanvaardbare oplossing bekomt. Dit alles wordt uitgelegd met een cijfervoorbeeld waaruit blijkt dat de optimale oplossing vaak wordt bereikt met de voorgestelde methode.

Van Asperen, Borgman en Dekker (2010) bespreken een simulatiemodel dat rekening houdt met discrete gebeurtenissen om online stapelregels te evalueren. Enkele entiteiten die gebruikt worden in de simulatie zijn de stapelplaatsen, de stapelkranen, de transportmodi, de tijden en vertragingen, de aankomst en het vertrek van containers en tenslotte de indeling van de terminal. In dit model wordt voornamelijk rekening gehouden met de korte termijn beslissingen in verband met het toewijzen van een container aan een opslagplaats. Net als in Duinkerken et al. (2001) is er sprake van *random stacking* en *levelling*. Naast de evaluatie van de verschillende stapelregels wordt er in van Asperen et al. (2010) ook geconcentreerd op de wisselwerking tussen het transport en het vinden van een stockageplaats. Uit de uitgevoerde experimenten is gebleken dat de nodige details en flexibiliteit aanwezig zijn om deze evaluatie te kunnen ondersteunen.

In Bielli, Boulmakoul en Rida (2006) wordt een raamwerk weergegeven voor een simulatiemodel waarmee men tracht de interne werking van container terminals te verbeteren. Dit simulatiemodel houdt niet enkel rekening met de inkomende en vertrekkende containers en hoe deze te stockeren, maar ook met het aantal machines die nodig zijn om alle handelingen uit te voeren. De doeleinden die men tracht te bereiken in dit artikel zijn de evaluaties van verschillende opslagmethoden en van alternatieve operaties om schepen te laden en te lossen met betrekking tot tijd en kosten.

Enkele operationele indicatoren die berekend en geëvalueerd worden zijn de globale productiviteit, de netto productiviteit, de gebruiksindex van de machines (zowel kaaikranen als werfkranen, maar ook de interne transportmodi), de bezettingsgraad van de werf en de gemiddelde wachttijd van het schip. In dit artikel wordt er ook verder ingegaan op de calibratie en de validatie van de simulator. Dit onderwerp wordt niet verder toegelicht in deze masterproef, omdat dit ons te ver zou leiden.

Naast deze modellen bestaat er nog een type die verschillende stapelstrategieën met elkaar vergelijkt. In Sauri en Martin (2011) worden drie strategieën vergeleken met elkaar om containers toe te wijzen aan subblokken in de terminal. Strategie 1 houdt in dat men start met de inkomende containers te stapelen bij het subblok met de containers die reeds het meeste tijd hebben doorgebracht in de terminal. Een andere strategie lijkt erg op deze eerste, maar gaat de inkomende containers stapelen in het subblok dat het laatst aangevuld is. Een derde strategie verschilt compleet van de eerste twee en houdt in dat men eerst de oudste containers gaat verplaatsen naar één of meerdere subblokken



om zo plaats te maken voor de inkomende containers. Aan de hand van een wiskundig model wordt nagegaan in welke omstandigheden de bovenvermelde strategieën optimaal zijn.

Een ander model dat de vergelijking maakt tussen verschillende manieren om containers te stapelen is Duinkerken et al. (2001). Een bespreking van dit artikel werd reeds gegeven in hoofdstuk 3, paragraaf 3.5.1.

De bovenstaande modellen leggen elk hun eigen accenten en verschillen van elkaar omwille van het feit dat ze bepaalde kenmerken al dan niet integreren. Om alle informatie overzichtelijk samen te zetten, is volgende tabel opgesteld. Naast de naam van de auteurs en het jaartal waarin het model is gepubliceerd worden meerdere karakteristieken weergegeven per model. Zo wordt er gekeken naar de categorie waartoe het model behoort, welk type model het is en voor welke soort terminals het model opgebouwd is.

Auteurs model	Jaar	Kosten	Tijd	Rehandles	Stapelstrategieën vergelijken	Type	Soort terminal
Bielli et al.	2006				X	Simulatie	Haven
Chen en Chao	2004	x				Tijd-ruimte netwerk	Export
Duinkerken et al.	2001			x	X	Simulatie	Haven
Han et al.	2008			x		C++	Transshipment
Imai et al.	2001		x			MIP (+Lagrange)	Haven
Kim en Kim	1999			x		Mathematisch model	Haven
Kim et al.	2000			x		DPM	Haven
Kozan	2000		x			MIP	Zeehaven
Kozan & Preston	1999		x			GA	Intermodaal
Kozan & Preston	2006			x		GA + TS	Haven
Nishimura et al.	2009		x			MIP (+Lagrange)	Haven*
Park et al.	2010	x				Mathematisch model	Haven
Preston & Kozan	2001		x			GA	Intermodaal
Sauri en Martin	2011			x	X	Mathematisch model	Zeehaven
van Asperen et al.	2010				X	Simulatie	Haven
Zeng en Yang	2009		x			GA	Haven
Zhang et al.	2003	x				C++	Haven

\*mega-containers

**Tabel 2: Overzicht besproken modellen in verband met de opslag van containers**

## **4.5. Keuze van de modellen die uitgewerkt worden**

Aan de hand van bovenstaande informatie en in samenspraak met mijn promotor prof. dr. Janssens, is beslist om twee modellen na te bouwen. Het eerste model houdt zich bezig met de tijd dat een schip doorbrengt in de haven en het andere model vergelijkt drie stapelstrategieën met elkaar om na te gaan bij welke strategie er het minst aantal herverplaatsingen nodig zijn.

Het eerste model dat in deze masterproef wordt nagebouwd is een onderdeel van het model van Zeng en Yang (2009). Het volledige model wordt niet nagebouwd wegens te ingewikkeld, enkel het lineair programmeringsprobleem dat tracht de *makespan* van het schip te minimaliseren. Het tweede model is gebaseerd op het model uit Sauri en Martin (2011) omdat hierin een paar andere veronderstellingen worden gedaan. Bij dit model wordt, in tegenstelling tot het vorige model, wel het volledige model nagebouwd. De verschillen met het originele bestaan uit enkele andere veronderstellingen en andere data.

## **4.6. Redenen om deze modellen uit te werken**

Er zijn enkele redenen waarom net deze modellen gekozen zijn. Ten eerste omdat er via deze twee modellen drie categorieën van modellen worden besproken. Het model van Sauri en Martin (2011) valt namelijk zowel onder de categorie van het evalueren van stapelstrategieën als onder de categorie van minimale herverplaatsingen. Ten tweede zijn beide modellen vrij recent, waardoor de data en de informatie uit deze artikels niet gedateerd is zoals bij andere oudere artikels. De derde reden is uit praktische overwegingen omdat deze modellen mogelijk zijn om na te bouwen met beschikbare softwarepakketten. Zo wordt er voor het model van Zeng en Yang (2009) gebruik gemaakt van LINDO en LINGO, voor het model van Sauri en Martin (2011) is dit Excel.

## Hoofdstuk 5: Uitwerking van de modellen

### 5.1. 'Integrating simulation and optimization to schedule loading operations in container terminals' van Zeng en Yang (2009)

#### 5.1.1. Inleiding

De voornaamste reden om dit model te kiezen, is het feit dat dit een LP (*linear programming*) probleem is. Dit soort problemen komt ook aan bod in het curriculum van de opleiding Handelsingenieur. Het aspect van het optimaliseren van een functie in dit model is een tweede reden waarom dit model gekozen is om nagebouwd te worden. Hieronder volgt een bespreking van het model.

Een onderwerp dat niet aan bod is gekomen bij de bespreking van de productiviteit van container terminals, is de planning van de kranen. Dit is echter ook een mogelijke manier om de productiviteit te verhogen, maar in deze masterproef wordt enkel de opslag van containers onderzocht. Er is veel onderzoek gedaan naar dit onderwerp bij zowel kaaikranen (Lee, Wang, & Miao, 2008) als bij kranen die aanwezig in de subblokken zoals *yard cranes* (Ng & Mak, 2005). Zo hebben o.a. Zhu en Lim (2004) een model opgesteld waarbij er met behulp van zowel *branch-and-bound* als *simulated annealing* gezocht wordt naar optimale oplossingen. Uit het feit dat veel onderzoek wordt gedaan naar dit onderwerp kan afgeleid worden dat het verbeteren van de planning van kranen een positief effect heeft op de productiviteit van de terminals.

Het model dat gebruikt wordt in het artikel van Zeng en Yang (2009) is gebaseerd op een *hybrid flow shop scheduling problem* (HFSS). Dit wordt door Ruiz en Vazquez-Rodriguez (2009) omschreven als 'een planning van *flow shops* met meerdere parallele machines per stadium dat leidt tot een complex combineerprobleem dat vaak wordt tegengekomen in de realiteit'. De karakteristieken van een HFSS worden weergegeven in Linn en Zhang (1999). Dit probleem bestaat in het algemeen uit een aantal productiestadia waar er verschillende machines parallel werken. Enkele stadia kunnen slechts één machine hebben, maar er moet minstens één stadium zijn waar er meer dan één machine aanwezig is om zo meerdere lijnen te creëren in het proces. Anders zou elke behandeling in elk stadium moeten gebeuren door telkens één machine waardoor de behandelingen in serie verlopen. Een andere karakteristiek in verband met een HFS (*hybrid flow shop*) is het feit dat de stroom van jobs slechts in één richting mogelijk zijn. Elke job wordt verwerkt door één machine in elk stadium en moet meerdere stadia doorlopen. De machines in deze stadia zijn ofwel identiek, ofwel uniform ofwel niet gerelateerd aan elkaar.

Deze karakteristieken zijn terug te vinden in dit probleem, dat bestaat uit een set  $J = \{1, 2, \dots, n\}$  van  $n$  jobs en elk van deze jobs moet gebeuren in  $S$  opeenvolgende stadia. Stadium  $s$  heeft een set van  $M(s)$  identieke machines met  $m_s = |M(s)|$  en  $s = 1, 2, \dots, S$ , voor dit probleem geldt  $S = 3$ . In elk stadium  $s$  zijn er  $m_s \geq 1$  identieke machines die parallel werken en voor ten minste één stadium zijn er zelfs  $m_s \geq 2$  parallel werkende identieke machines beschikbaar. De verwerkingstijd van een job  $i$  in stadium  $s$  wordt weergegeven door de variabele  $p_{is}$ . Elke machine kan slechts één job tegelijkertijd uitvoeren. Een andere karakteristiek van de machines is het feit dat alle machines in een bepaald stadium identiek zijn en dat geen voorrang toegelaten is voor bepaalde containers. In dit probleem zijn er vijf machines aanwezig op de terminal, verdeeld over de drie stadia. De eindtijd van de bewerking in stadium  $s$  van job  $i$  wordt weergegeven door de variabele  $C_{is}$ . Het HFSS is opgesteld om de *makespan*, d.i. de maximale tijd die nodig is om alle containers te verwerken ( $C_{\max}$ ) te minimaliseren met  $C_{\max} = \max C_{is}$ .

Het grote nadeel bij dit model is het feit dat dit *NP-hard* is, wat wil zeggen dat het nagenoeg onmogelijk is om een optimale oplossing te vinden voor een probleem van grote schaal. Om dit probleem op te lossen wordt vaak gebruik gemaakt van heuristische algoritmen om goede benaderingen te bekomen van de optimale oplossing. In deze masterproef wordt gebruik gemaakt van een kleinschalig cijfervoorbeeld om de werking van het model te verduidelijken. Eerst wordt de opbouw van het model weergegeven aan de hand van de gebruikte parameters, variabelen en beperkingen.

### 5.1.2. Probleem parameters

$N$ : de set van alle containers

$n$ : het aantal containers

$i, j$ : de index van containers

$s$ : de index van een stadium,  $s = 1, 2, 3$

$m$ : de index van een machine

$m_s$ : het aantal machines in stadium  $s$

$M_{is}$ : de set van mogelijke machines om container  $i$  te verwerken in stadium  $s$

$E_m$ : de set van containers die verwerkt kunnen worden door machine  $m$ .

Deze variabele  $E_m$  wordt echter niet mee opgenomen in deze versie van het model. Elke container kan dus behandeld worden door elke machine.

$B$ : de set van containerparen waartussen een voorrangrelatie bestaat, wanneer container  $i$  voor container  $j$  moet verwerkt worden door machine  $m$

Deze variabele wordt niet expliciet vermeld in het model.

- $p_{is}$ : de verwerkingstijd van container  $i$  in stadium  $s$   
 $w_{ijs}$ : de insteltijd tussen container  $i$  en container  $j$  in stadium  $s$   
 $H$ : een voldoende grote constante waarde

### 5.1.3. Beslissingsvariabelen

- $x_{ism} = 1$ : wanneer de behandeling voor container  $i$  in stadium  $s$  is toegewezen aan machine  $m$ . Deze variabele heeft de waarde nul wanneer niet voldaan is aan deze voorwaarde.  
 $y_{ijsm} = 1$ : wanneer de behandeling van container  $i$  en container  $j$  in stadium  $s$  op dezelfde machine  $m$  gepland zijn, anders heeft deze variabele de waarde nul  
 $z_{ijsm} = 1$ : wanneer de behandeling van container  $j$  onmiddellijk volgt op de behandeling van container  $i$  op machine  $m$  in stadium  $s$ , anders heeft deze variabele de waarde nul  
 $t_{is}$ : de starttijd van een container  $i$  in stadium  $s$   
 $C_{max}$ : de afrondingstijd van de laatste container, de tijd waarop alle containers verwerkt zijn

### 5.1.4. Het planningsmodel

$$(1) \quad \text{Min } C_{max} = \max_{i,s} (t_{is} + p_{is})$$

met beperkende voorwaarden

- $$(2) \quad \sum_{m \in M_{is}} x_{ism} = 1 \quad \forall i \in N, \forall s \in \{1,2,3\}$$
- $$(3) \quad t_{is} \geq 0 \quad \forall i \in N, \forall s \in \{1,2,3\}$$
- $$(4) \quad t_{is} + p_{is} \leq t_{i(s+1)} \quad \forall i \in N, \forall s \in \{1,2,3\}$$
- $$(5) \quad y_{ijsm} = y_{jism} \quad \forall i, j \in E_m, \forall s \in \{1,2,3\}, \forall m \in M_{is}$$
- $$(6) \quad y_{ijsm} \leq 0.5(x_{ism} + x_{jism}) \leq y_{ijsm} + 0.5 \quad \forall i, j \in E_m, \forall s \in \{1,2,3\}, \forall m \in M_{is}$$
- $$(7) \quad \sum_{j \in E_m} z_{ijsm} \leq 1 \quad \forall i \in E_{m'}, \forall s \in \{1,2,3\}, \forall m \in M_{is}$$
- $$(8) \quad \sum_{j \in E_m} z_{jism} \leq 1 \quad \forall i \in E_{m'}, \forall s \in \{1,2,3\}, \forall m \in M_{is}$$
- $$(9) \quad z_{ijsm} + z_{jism} \leq 1 \quad \forall i, j \in E_{m'}, \forall s \in \{1,2,3\}, \forall m \in M_{is}$$
- $$(10) \quad x_{ism} - 0.5 \leq 0.5(z_{ijsm} + z_{jism}) \leq x_{ism} \quad \forall i, j \in E_{m'}, \forall s \in \{1,2,3\}, \forall m \in M_{is}$$
- $$(11) \quad t_{i(s+1)} + w_{ijs} \leq t_{js} + H(1 - z_{ijsm}) \quad \forall i, j \in E_{m'}, \forall s \in \{1,2,3\}, \forall m \in M_{is}$$
- $$(12) \quad t_{is} \leq t_{js} \quad \forall i, j \in B, \forall s \in \{1,2,3\}$$
- $$(13) \quad x_{ism} \cdot y_{ijsm} \cdot z_{ijsm} = 0 \text{ of } 1 \quad \forall i, j \in N, \forall s \in \{1,2,3\}, \forall m \in M_{is}$$

De doelfunctie van dit model gaat op zoek naar de minimale som van alle bewerkingstijden. De eerste beperking waarborgt dat elke handeling gebeurt door exact één machine. Beperking (3) zorgt ervoor dat elke handeling start op een tijdstip dat groter dan of gelijk aan nul is. Enkel de eerste handeling start op tijdstip nul, alle andere handelingen starten op een tijdstip  $t$  waar  $t > 0$ . Beperking (4) verzekert dat de volgorde van de handelingen in verschillende stadia gerespecteerd wordt. Beperkingen (5) en (6) hebben als gevolg dat  $y_{ijsm} = y_{jism} = 1$  als  $x_{ism} = x_{jsm} = 1$ . Beperkingen (7) en (8) zorgen voor het feit dat elke handeling maximaal één voorganger en één opvolger heeft op machine  $m$ . De volgende beperking verzekert dat  $z_{ijsm}$  en  $z_{jism}$  niet tegelijkertijd de waarde één hebben. Deze beperking is nodig omwille van het feit dat container  $i$  niet tegelijkertijd voor en na container  $j$  kan geplaatst worden op hetzelfde stadium  $s$ . Beperking (10) daarentegen heeft als gevolg dat  $x_{ism} = 1$  als  $z_{ijsm} + z_{jism} = 1$ .

Beperking (11) geeft aan dat container  $j$  pas kan behandeld worden vanaf een tijdstip  $t_{js}$  dat groter dan of gelijk aan de waarde van de som van de starttijd van container  $i$  op stadium  $s + 1$  en de *set-up* tijd tussen container  $i$  en  $j$  op stadium  $s$  is. Dit betekent dat een volgende container pas kan verwerkt worden op een bepaalde machine nadat de vorige container behandeld is en nadat de machine opnieuw ingesteld is om een volgende container te behandelen. In het geval dat container  $j$  onmiddellijk volgt na container  $i$  op een bepaalde machine, krijgt de factor  $H(1 - z_{ijsm})$  de waarde nul. In alle andere gevallen wordt aan deze factor een waarde  $H$  toegekend waarbij  $H = 10000$ . Hierdoor wordt het rechterlid erg groot waardoor de beperking geen waarden beperkt. De set van jobparen waartussen een voorrangrelatie bestaat wordt bepaald door de voorlaatste beperking (12). De laatste beperking (13) geeft aan welke variabelen binair zijn.

### 5.1.5. Implementatie van het model in de optimalisatiesoftware LINGO

Het optimalisatiemodel, geformuleerd in sectie 5.1.4., is ingegeven in het programma LINGO en de input bestaat uit verschillende delen, dewelke teruggevonden kunnen worden in bijlage 1. Zo begint het model met de definitie van variabelen in sets. De sets, die in dit model worden gedefinieerd, hebben betrekking op het aantal containers, vier in dit voorbeeld. Voorts worden ook het aantal machines en het aantal stadia bepaald, respectievelijk vijf en drie. Vervolgens worden de drie types binaire variabelen gedefinieerd met behulp van drie indices, nl. container, stadium en machine. Om af te sluiten, worden de verwerkings- en insteltijden gedefinieerd. In een volgende stap worden aan deze twee tijden waarden gegeven door gebruik te maken van het commando 'DATA'.

Na de definitie van sets en data wordt het model ingegeven, te beginnen met de doelfunctie. De eerste beperking is nodig om de waarde van  $CMAX$  te bepalen. Deze waarde moet groter dan of gelijk

zijn aan de waarde van de som  $t_{is} + p_{is}$ . De volgende acht beperkingen komen overeen met formule (2) t.e.m. (10). De opbouw van deze acht beperkingen zijn allemaal gelijkaardig. Eerst wordt verklaard dat de beperking geldt voor elke container  $i$ . In de beperkingen waar ook gekeken wordt naar de containers met index  $j$ , wordt ook aangegeven dat de beperking geldt voor alle containers  $j$  door de code '@FOR(CONTAINERS(J))'.

Vervolgens wordt aangegeven dat elke beperking ook geldt voor elk stadium en voor elke machine. In de vierde en dertiende beperking staat echter een uitzondering hierop. De code vermeldt '@FOR(STAGES(S)|S #LE# 2', d.w.z. dat deze beperking enkel geldt voor waarden van  $s$  die kleiner of gelijk zijn aan twee. Deze beperkende voorwaarde is nodig omdat in deze beperking de variabele  $t_{i(s+1)}$  wordt geïntroduceerd. Zonder deze voorwaarde zou bijvoorbeeld ook de variabele  $t_{i4}$  mogelijk zijn, maar deze waarde bestaat niet in dit voorbeeld. Een gelijkaardige beperkende voorwaarde is '@FOR(CONTAINERS(J) |J #NE# I' waarbij vereist wordt dat de waarde  $i$  niet gelijk is aan deze van  $j$ . Merk op dat de waarde van  $j$  in dit geval ook kleiner mag zijn dan de waarde van  $i$ .

Na de formulering van de beperkingen die beginnen met de code '@FOR', wordt expliciet neergeschreven dat de waarde van de starttijd van container  $i$  op elk stadium  $s$  kleiner dan of gelijk aan de starttijd van container  $i+1$  in elk stadium  $s$  moet zijn. Tenslotte geven de laatste drie beperkingen aan dat de variabelen  $x_{ism}$ ,  $y_{ijsm}$  en  $z_{ijsm}$  binaire variabelen zijn.

In de software LINGO bestaat de mogelijkheid om het ingegeven model volledig te laten uitschrijven beperking per beperking. Het bovenstaande model bevat 1381 regels code, exclusief de beperkingen die aangeven dat de variabelen  $x_{ism}$ ,  $y_{ijsm}$  en  $z_{ijsm}$  binaire variabelen zijn. Uit deze uitwerking blijkt dat alle beperkingen op een correcte manier worden gegenereerd conform het oorspronkelijke model in Zeng en Yang (2009). Het probleem is echter dat LINGO geen toelaatbare (*feasible*) oplossingen bekomt voor dit model.

Wegens een gebrek aan tijd en omwille van tal van onvoorziene omstandigheden is het niet mogelijk geweest om het model dermate aan te passen zodat mogelijke optimale oplossingen bekomen worden. In volgende paragraaf wordt een diepgaandere bespreking uitgevoerd in verband met het beschreven model en worden mogelijke aanpassingen aangegeven om het model te optimaliseren.

### 5.1.6. Kritische bespreking van het model

Zoals reeds vermeld maakt het optimalisatiemodel gebruik van het begrip *makespan* in de doelstelling. De *makespan* wordt gedefinieerd als de tijdsperiode tussen de aanvang van de werken en het einde ervan. Indien alle jobs klaar zijn om aan te vatten op tijdstip 0, stemt de *makespan* overeen met het einde van de laatste bewerking op de laatste job (m.a.w. het maximum van alle *completion times* van de jobs, of anders geformuleerd ook het maximum van alle *completion times* van de werkingen – deze laatste definitie is nodig indien niet alle jobs dezelfde laatste bewerking hebben).

Met  $C_{is}$  gedefinieerd als de *completion time* van stadium  $s$  van job  $i$ , is het bepalen van de *makespan* gelijk aan het bepalen van  $\max C_{is}$  (over alle  $i$ , over alle  $s$ ). Anderzijds is  $C_{is}$  ook gelijk aan de aanvangstijd van stadium  $s$  van job  $i$  ( $t_{is}$ ), verhoogd met de bewerkingstijd van stadium  $s$  van job  $i$  ( $p_{is}$ ), of m.a.w.  $C_{is} = t_{is} + p_{is}$  of de *makespan* is  $\max \{t_{is} + p_{is}\}$  (over alle  $i$ , over alle  $s$ ).

Als de doelstelling geformuleerd wordt als het zo snel mogelijk verwerken van een takenpakket, komt dit neer op het minimaliseren van de *makespan*. Dus de doelfunctie van het optimalisatiemodel kan geformuleerd worden als:

$$\text{Min } \max \{t_{is} + p_{is}\} \text{ (over alle } i, \text{ over alle } s)$$

Daar deze doelstelling niet-lineair is, is ze niet dadelijk bruikbaar voor een *LP solver*. De doelfunctie kan echter gelineariseerd worden als:

$$\text{Min } C_{max}$$

Onder de voorwaarden:

$$t_{is} + p_{is} \leq C_{max} \text{ (voor alle } i, \text{ voor alle } s)$$

Stel dat er oneindig vele machines zijn en dat deze machines aan alle stadia tegelijkertijd kunnen werken, dan is de *makespan* gelijk aan de langste bewerkingstijd vermits alle  $t_{is} = 0$ .



Het LP met onderstaande formulering geeft als oplossing de waarde 3.

MODEL:

```
MIN= CMAX ;  
- CMAX + T_C1_S1 <= - 2 ;  
- CMAX + T_C1_S2 <= - 3 ;  
- CMAX + T_C1_S3 <= - 1 ;  
- CMAX + T_C2_S1 <= - 2 ;  
- CMAX + T_C2_S2 <= - 3 ;  
- CMAX + T_C2_S3 <= - 1 ;  
- CMAX + T_C3_S1 <= - 2 ;  
- CMAX + T_C3_S2 <= - 3 ;  
- CMAX + T_C3_S3 <= - 1 ;  
- CMAX + T_C4_S1 <= - 2 ;  
- CMAX + T_C4_S2 <= - 3 ;  
- CMAX + T_C4_S3 <= - 1 ;
```

END

Stel dat elke job  $s$  stadia moet doorlopen ( $S$  gelijk voor elke job  $i$ ) en dat de stadia in een welbepaalde volgorde geplaatst zijn zodat stadium  $s$  onmiddellijk voorafgaat aan stadium  $s + 1$ . Merk op dat het aantal machines oneindig groot is.

In het voorbeeld zijn drie stadia verondersteld per job, dus per job worden twee beperkingen toegevoegd, die stellen dat ten eerste de aanvangstijd van stadium 2 minstens zo groot dient te zijn als de aanvangstijd van stadium 1 verhoogd met de bewerkingstijd van stadium 1, en ten tweede de aanvangstijd van stadium 3 minstens zo groot dient te zijn als de aanvangstijd van stadium 2 verhoogd met de bewerkingstijd van stadium 2, of m.a.w.  $t_{i2} \geq t_{i1} + p_{i1}$  en  $t_{i3} \geq t_{i2} + p_{i2}$  voor alle jobs  $i$ . In het voorbeeld leidt dit tot 6 bijkomende beperkingen.

```
T_C1_S1 - T_C1_S2 <= - 2 ;  
T_C1_S2 - T_C1_S3 <= - 3 ;  
T_C2_S1 - T_C2_S2 <= - 2 ;  
T_C2_S2 - T_C2_S3 <= - 3 ;  
T_C3_S1 - T_C3_S2 <= - 2 ;  
T_C3_S2 - T_C3_S3 <= - 3 ;  
T_C4_S1 - T_C4_S2 <= - 2 ;  
T_C4_S2 - T_C4_S3 <= - 3 ;
```

Het LP met deze bijkomende beperkingen heeft als oplossing de waarde 6, wat het maximum betekent van de som van de bewerkingstijden in de drie stadia (2 + 3 + 1). In het voorbeeld is deze som voor de vier jobs dezelfde.

Stel nu de volgende vereenvoudigde situatie: aan elk stadium wordt één machine toegewezen en deze machine kan enkel voor dit stadium worden gebruikt. Stel dat we deze machines benoemen als  $M_1$  voor stadium 1,  $M_2$  voor stadium 2 en  $M_3$  voor stadium 3. In de notatie van het model betekent dit dat:

$$\begin{aligned} M_{i1} &= \{M_1\} && \text{voor alle jobs } i \\ M_{i2} &= \{M_2\} && \text{voor alle jobs } i \\ M_{i3} &= \{M_3\} && \text{voor alle jobs } i \end{aligned}$$

en vermits dus die unieke machine per stadium alle jobs moet aankunnen is:

$$E_1 = E_2 = E_3 = \{1,2,3,4\}$$

Dit heeft tevens als gevolg dat in de beslissingsvariabele  $z_{ijsm}$  de index-combinatie  $(s,m)$  uniek is. Op die wijze lijkt het systeem bijzonder op een *flow-shop*. Indien de *set-up* tijden tussen elk koppelt jobs  $(i,j) = 0$ , is het bovendien een zuivere *flow-shop*.

De beperkingen van het type

$$\sum_{j=i} z_{ijsm} \leq 1$$

worden geformuleerd per job  $i$  en per stadium  $s$ . Het linkerlid bestaat uit 3 termen en stelt als doel dat job  $i$  maximaal aan één job onmiddellijk kan voorafgaan. De som van de linkerkant is gelijk aan 1, tenzij job  $i$  als laatste wordt gescheduled want dan is de som gelijk aan 0.

De beperkingen van het type

$$\sum_{j=i} z_{jism} \leq 1$$

worden geformuleerd per job  $i$  en per stadium  $s$ . Het linkerlid bestaat uit 3 termen en stelt als doel dat maximaal één job onmiddellijk aan job  $i$  kan voorafgaan. De som van de linkerkant is gelijk aan 1, tenzij job  $i$  als eerste wordt gescheduled; dan is de som gelijk aan 0.

De beperkingen van het type

$$z_{ijsm} + z_{jis m} \leq 1$$

worden geformuleerd per koppel jobs  $(i, j)$  waarbij  $i \neq j$  en per stadium  $s$ . Ze dienen om de ongerijmdheid uit te sluiten waarbij tegelijkertijd wordt gesteld dat job  $i$  onmiddellijk job  $j$  moet voorafgaan en dat job  $j$  onmiddellijk job  $i$  moet voorafgaan.

Deze drie types van beperkingen leggen de grenzen en voorwaarden vast van de waarden die de variabelen  $z_{ijsm}$  mogen aannemen. Merk echter op dat geen van deze drie types van beperkingen het LP tegenhoudt om aan alle variabelen  $z_{ijsm}$  de waarde nul toe te kennen. Dit is een zwak punt in de formulering.

De overige types van beperkingen waarin  $z_{ijsm}$  optreedt, dienen om een link te leggen naar andere beslissingsvariabelen zoals  $x_{ism}$  en  $t_{is}$  (zie de beperkingen van het type 10 en 11), doch leggen geenszins waarden op aan  $z_{ijsm}$ . Bovendien kunnen kritische opmerkingen geformuleerd worden betreffende beide types.

De beperkingen van het type

$$x_{ism} - 0.5 \leq 0.5(z_{ijsm} + z_{jis m}) \leq x_{ism}$$

hebben volgens de auteurs als doelstelling de waarde van  $x_{ism}$  op 1 te dwingen indien er een job  $j$  bestaat in dezelfde stadium die ofwel onmiddellijk voor of na job  $i$  wordt geroosterd. Doch er kan best een situatie bestaan waarbij job  $j$  twee plaatsen voor of twee plaatsen na job  $i$  wordt bewerkt in de stadium  $s$ . In dat geval zijn beide variabelen  $z_{ijsm}$  en  $z_{jis m}$  gelijk aan 0 en toch is  $x_{ism} = 1$ , waardoor de beperkende voorwaarde:  $0.5 \leq 0 \leq 1$  niet geldig is. In dit voorbeeld van de *flow-shop* wordt elke job  $i$  in elk van de drie stadia bewerkt, dus is  $x_{ism} = 1$  voor elke job en voor elke stadium.

De beperkingen van het type

$$t_{i(s+1)} + w_{ijs} \leq t_{js} + H(1 - z_{ijsm})$$

hebben als doelstelling correcte starttijden voor de jobs te bepalen zodat geen overlapping in de tijd tussen twee jobs op dezelfde machine (lees: hetzelfde stadium) kan gebeuren. Bij deze beperkingen kunnen twee opmerkingen geformuleerd worden waarvan de eerste het gevolg is van een eerder aangehaalde zwakheid in de formulering en de tweede specifiek is aan deze beperking.

Daar geen enkele voorwaarde verplicht dat één van de  $z_{ijsm}$  variabelen de waarde 1 dient aan te nemen, zal de *solver* ze allen de waarde 0 geven, met als gevolg dat deze beperkingen zich herleiden tot het feit dat het linkerlid dient kleiner te zijn dan een zeer groot getal  $H$ . Deze beperkingen beperken dus niets in het bereiken van de oplossing.

Het model neemt een *set-up* tijd in overweging bij de overschakeling van job  $i$  naar job  $j$  in een stadium  $s$ , voorgesteld door het gegeven  $w_{ijs}$ . De logica stelt dat na de beëindiging van job  $i$ , de *set-up* tijd wordt ingevuld waarna job  $j$  kan starten op tijdstip  $t_{js}$ . Doch hier wordt de *set-up* pas gestart na de aanvang van job  $i$  in de volgende stadium  $(s+1)$ , dus na  $t_{i(s+1)}$ . De aanvang van job  $i$  in stadium  $(s+1)$  hoeft echter niet samen te vallen met het beëindigen van job  $i$  in stadium  $s$ , bijvoorbeeld wanneer die ene machine in stadium  $(s+1)$  nog een bewerking uitvoert op de voorgaande job. De formulering van deze beperking levert geen ontoelaatbaarheid op, doch laat ook niet toe de optimale oplossing te vinden daar het linkerlid hoger is dan vereist en daardoor  $t_{js}$  een te hoge waarde aanneemt.

Tot hier de kritische opmerkingen. Doch nu ontspruit de lastige taak om deze zwakheden op te vangen. De laatste opmerking in de beperkingen van het type (11) kunnen makkelijk worden opgevangen door het aanvangstijdstip van job  $i$  in stadium  $(s+1)$  te vervangen door het beëindigings-tijdstip van job  $i$  in stadium  $s$ , m.a.w.

$$t_{is} + p_{is} + w_{ijs} \leq t_{js} + H(1 - z_{ijsm})$$

voor alle job-combinaties  $(i, j)$  en voor elke stadium  $s$ .

Om te beletten dat alle  $z_{ijsm}$  variabelen de waarde 0 aannemen kan de volgende strategie worden gevolgd. Maak eerste de volgende bedenkingen met betrekking tot de linkerleden van de volgende types van beperkingen:

$$\sum_{j=1} z_{ijsm} \leq 1$$

en

$$\sum_{j=i} z_{jism} \leq 1$$

De beperkingen van deze types worden geformuleers per job  $i$  en per stadium  $s$ . Elk van beide types bevat 12 beperkingen omwille van het feit dat in elk stadium  $s$  met  $s = \{1,2,3\}$  respectievelijk maximaal één onmiddellijke opvolger en één onmiddellijke voorganger kan zijn.

Indien de job  $i$  eerst wordt geroosterd, is het eerste linkerlid gelijk aan 1 en het tweede linkerlid gelijk aan 0. Indien job  $i$  niet eerst en niet laatst wordt geroosterd, hebben beide linkerleden de waarde 1. Indien job  $i$  laatst wordt geroosterd, is het eerste linkerlid gelijk aan 0 en het tweede gelijk aan 1. Indien beide linkerleden worden samengeteld, stelt deze som de onmiddellijke relaties voor van job  $i$ , zij het voor, achter of beide. En deze som kan enkel de waarden 1 of 2 aannemen, naargelang de plaats van job  $i$  in het rooster. Dus indien we stellen dat deze som minstens de waarde 1 moet aannemen, dwingen we het programma om minstens één relatie met job  $i$  vast te leggen, of m.a.w.

$$\sum_{j \neq i} z_{ijsm} + \sum_{j \neq i} z_{jis m} \geq 1$$

De beperking van dit type wordt geformuleers per koppel jobs  $(i, j)$ , waarbij  $i \neq j$ , en per stadium  $s$ . Dit levert 6 koppels van containers op, in elk van de drie stadia, waardoor er 18 beperkingen zijn.

Deze voorwaarde is echter niet voldoende om tot een toelaatbare oplossing te komen. De reden waarom wordt uitgewerkt aan de hand van volgende illustratie:

De z-relaties zouden kunnen betekenen dat:

Container 1 → Container 2

Container 3 → Container 4

Bij deze oplossing heeft Container 1 een opvolger, Container 2 een voorganger, Container 3 een opvolger en Container 4 een voorganger. Met als gevolg dat de voorwaarde voldaan is maar er geen toelaatbare oplossing is daar de bewerking op Container 1 en Container 3 tegelijkertijd kan worden geroosterd. Om dit probleem aan te pakken, dient in de input te gespecificeerd te worden dat in een bepaald stadium  $s$ , waarin  $N$  containers worden behandeld,  $N - 1$  voorrangrelaties moeten optreden (in dit voorbeeld 3 relaties). Met andere woorden moeten van de 12 mogelijke verbindingen (4 containers in relatie met 3 andere containers) drie voldaan zijn.

De input in LINGO, voor stadium 1 en machine 1, zal in dit geval overeenstemmen met volgende code:

$$Z\_C1\_C2\_S1\_M1 + Z\_C1\_C3\_S1\_M1 + Z\_C1\_C4\_S1\_M1 + Z\_C2\_C1\_S1\_M1 + Z\_C3\_C1\_S1\_M1 + Z\_C4\_C1\_S1\_M1 + Z\_C2\_C3\_S1\_M1 + Z\_C2\_C4\_S1\_M1 + Z\_C3\_C2\_S1\_M1 + Z\_C4\_C2\_S1\_M1 + Z\_C4\_C3\_S1\_M1 + Z\_C3\_C4\_S1\_M1 = 3 ;$$

Een andere opmerking in verband met dit model is het feit dat niet op een directe manier rekening wordt gehouden met eventuele wachtrijen aan de machines. Deze worden mogelijk verwerkt in de starttijden van elke container bij een nieuw stadium, na behandeld te zijn geweest in een vorig stadium, maar hier is geen zekerheid over. Om dit probleem op te vangen, kan gebruik gemaakt worden van een extra variabele die deze wachttijden opneemt.

## **5.2. Model 2: 'Space allocating strategies for improving import yard performance at marine terminals' van Sauri en Martin (2011)**

### **5.2.1. Inleiding**

Het tweede model dat in verder detail wordt bestudeerd in deze masterproef tracht aan de hand van een analytisch model het aantal herverplaatsingen in de toekomst te bepalen van containers die reeds aanwezig zijn op de terminal. Het voorgestelde model wordt toegepast op drie stapelstrategieën die geïntroduceerd worden in dit artikel van Sauri en Martin (2011). Deze studie had als doel te bepalen onder welke voorwaarden nieuwe containers kunnen gestapeld worden op oude containers, op basis van het verwachte aantal herverplaatsingen.

In dit model worden twee onproductieve verplaatsingen omschreven, afhankelijk van de gebruikte strategie. Het totaal aantal herverplaatsingen bestaat uit het aantal verplaatsingen die te maken hebben met de verticale positie van een container en het aantal verplaatsingen om containers die reeds geruime tijd aanwezig zijn op de terminal te heralloceren. Deze laatstgenoemde verplaatsingen komen enkel voor in één van de drie strategieën.

### **5.2.2. Stapelstrategieën**

De beschreven strategieën bestaan uit twee stadia en trachten onproductieve verplaatsingen en hun bijhorende operationele kosten te verminderen. Enkele van de belangrijkste variabelen van deze strategieën zijn de tijd tussen de aankomst van verschillende schepen, de aankomsttijd van de containers en de gemiddelde tijd dat containers opgeslagen worden op de werf.

Het eerste stadium is hetzelfde voor alle drie de strategieën en houdt in dat de containers van verschillende schepen worden gescheiden. Het aantal stapels dat vereist is om de containers van een bepaald schip te stapelen is afhankelijk van de maximale stapelhoogte en de breedte van het blok. De maximale stapelhoogte heeft als bovengrens de maximale hoogte die gestapeld kan worden door de desbetreffende kraan, in dit geval een *RMG (rail-mounted gantry crane)*. Deze kraan werd reeds besproken in paragraaf '3.3.6.1. Kranen' en op afbeelding 11 en afbeelding 12 is een voorbeeld van dergelijke kraan zichtbaar. De optimale hoogte wordt bepaald aan de hand van de vraag en het aantal onproductieve verplaatsingen. Deze laatste is direct afhankelijk van de stapelhoogte, maar is ook gerelateerd aan de configuratie van de stapel.

Vanaf het moment dat een blok gevuld wordt met containers, kunnen deze containers opnieuw opgehaald worden om verder getransporteerd te worden. Als gevolg zal het aantal containers dalen volgens een bepaalde snelheid. Met andere woorden de bezettingsgraad van het blok daalt als de tijd stijgt.

Het tweede stadium geeft weer welke procedure wordt gebruikt per strategie om containers van verschillende schepen samen te plaatsen. Strategie 1 en 2 lijken erg op elkaar. Zo houdt strategie 1 in dat containers die nieuw aankomen op de terminal geplaatst worden op het sub-blok waar de containers geplaatst zijn die de langste tijd hebben doorgebracht in de terminal. Het is gunstig om de 'nieuwe' containers hier te stockeren omdat er meer vrije plaatsen zijn in deze sub-blokken. Dit ondanks het feit dat deze 'oude' containers een hogere kans hebben om de terminal te verlaten en er dus een grotere kans is op herverplaatsingen.

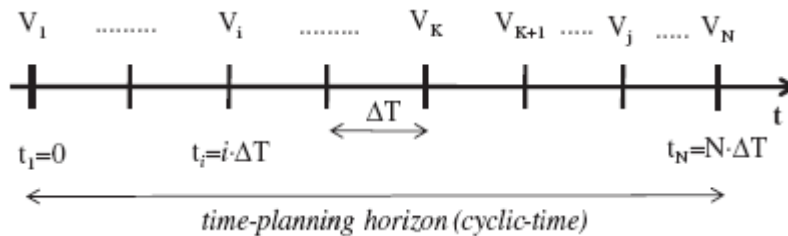
Strategie 2 daarentegen plaatst de 'nieuwe' containers niet bij de 'oudste' containers, maar bij het sub-blok waar laatst containers zijn gestockeerd. De idee achter deze methode is dat de tijd die containers, die laatst zijn gestapeld, weinig verschilt van de tijd die de 'nieuwe' containers zullen doorbrengen in de terminal. Het verschil in kans dat containers moeten vertrekken is kleiner bij deze strategie omdat deze afhankelijk is van de tijd tussen de aankomst van verschillende schepen. Het nadeel bij deze strategie is wel dat deze sub-blokken meer gevuld zijn dan in strategie 1 waardoor er algemeen meer sub-blokken nodig zijn om de containers van het laatste schip op te slaan.

De derde strategie gaat helemaal anders te werk. In deze strategie komen de verplaatsingen voor van containers die reeds geruime tijd aanwezig zijn op de terminal. Men verplaatst de oudste containers naar de sub-blok(ken) die het laatst zijn aangevuld waardoor de nieuw aangekomen containers kunnen geplaatst worden in de vrijgekomen sub-blok(ken). Zo worden de 'oude' containers geplaatst op containers die minder lang opgeslagen zijn en dus een lagere kans hebben om het opslagterrein te verlaten.

### 5.2.3. Veronderstellingen

Enkele veronderstellingen die worden gemaakt in verband met dit model zijn:

- De tijd tussen aankomst van verschillende schepen is constant;
- Het aantal containers per schip is constant;
- In tegenstelling tot het originele model dat gebruikt wordt door Sauri en Martin (2011) volgt de tijd dat een container doorbrengt in de terminal niet een Weibull verdeling. Volgens Sauri en Martin (2011) geven andere onderzoekers de voorkeur aan de exponentiële verdeling, dewelke een specifiek geval is van de Weibull-verdeling. De exponentiële verdeling is gemakkelijker om berekeningen mee uit te voeren en wordt o.a. daarom verkozen in deze masterproef;
- De import blok is opgedeeld in  $K$  sub-blokken en hebben elk dezelfde capaciteit;
- De maximale stapelhoogte is beperkt;
- Het is niet mogelijk om containers van meer dan twee verschillende schepen samen in één sub-blok te stockeren;
- De tijdsplanning horizon is cyclisch (zie onderstaande afbeelding 17);
- Herverplaatsingen van herverplaatste containers (secundaire verplaatsingen) worden niet in beschouwing genomen.



**Afbeelding 16: Diagram van de aankomsten op de terminal en de tijd-planningshorizon (Sauri & Martin, 2011)**

Deze laatste assumptie wordt nog verder verklaard in het originele artikel. De voornaamste reden om deze assumptie aan te nemen is het feit dat het percentage secundaire verplaatsingen maximaal 4% bedraagt van het totaal aantal. Dit is volgens andere onderzoekers een verwaarloosbaar aantal (Sauri & Martin, 2011).

### 5.2.4. Variabelen

- $N$ : totaal aantal schepen dat aankomt op de terminal;
- $K$ : aantal sub-blokken in import blok, elke blok heeft dezelfde capaciteit;
- $i$ : index met als waarden  $i \in [1, K]$ ;
- $j$ : index met als waarden  $j \in [K + 1, N]$ ;



- $n$ : aantal containers dat gelost wordt van elk schip;
- $h$ : maximum aantal containers per stapel;
- $\Delta T$ : de tijd tussen de aankomst van verschillende schepen, deze waarde is constant;
- $t_i$ : aankomsttijd van ship  $V_i, i \in [1, k]$ ;
- $t_j$ : aankomsttijd van ship  $V_j, j \in [k + 1, N]$ ;
- $V_i$ : identificatie voor schepen waarvan de containers gestockeerd zijn in de K sub-blokken,  $i \in [1, k]$ ;
- $V_j$ : identificatie voor schepen die na tijdstip  $t_j$  aankomen in de terminal;
- $\delta_j^{S_y}$ : aantal sub-blokken die nodig zijn om de nieuwe containers van schip  $V_j$  te stapelen bij strategie  $S_y, y \in [1,3]$ ;
- $C_j^{S_y}$ : een set die alle combinaties van containers bevat voor een bepaalde strategie  $S_y, y \in [1,3]$ ;
- $S_{(i,j)}$ : aantal stapels die containers combineren van schip  $V_i$  en  $V_j$ ;
- $\Delta R_{ij}$ : stijging van aantal herverplaatsingen relatief tot een homogene stapel (uitgedrukt als een percentage).

### 5.2.5. Toelichting van het analytisch model

In deze paragraaf worden de formules toegelicht die voorkomen in het originele model. De volgende paragraaf geeft een duidelijker beeld hoe deze formules in een elektronisch werkblad (hier Microsoft Excel) worden weergegeven. Vervolgens worden de data en resultaten van twee scenario's met elkaar vergeleken om tot een conclusie te komen in verband met het model.

De eerste formule die belangrijk is in het model is de tijd dat een container doorbrengt op de terminal. Dit is een niet-negatieve, continue, willekeurige variabele waarvan de distributiefunctie  $F(t)$  een exponentiële verdeling volgt. Deze distributiefunctie geeft de kans weer dat een container de terminal reeds heeft verlaten vóór tijdstip  $t$ .

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (1)$$

De overlevingsfunctie  $S(t)$  geeft het de kans weer dat een bepaalde container de terminal niet heeft verlaten op tijdstip  $t$  en dus nog steeds aanwezig is in de stapel. Deze functie wordt weergegeven als:

$$S(t) = P(T \geq t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda t} \quad (2)$$

De kans dat een container de terminal verlaat tijdens het interval  $(t + dt]$  wanneer deze gebeurtenis zich nog niet heeft voorgedaan vóór tijdstip  $t$  wordt gegeven door:

$$h(t) = \lim_{dt \rightarrow 0} \frac{P(t \leq T \leq t + dt | T \geq t)}{dt} = \frac{f(t)}{S(t)} = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda \quad (3)$$

Deze functie  $h(t)$  wordt de *hazard* functie genoemd en geeft de onmiddellijke snelheid weer waarmee een container de terminal verlaat op tijdstip  $t$  wanneer de container nog steeds aanwezig is in de stapel. Merk op dat deze functie een constante wordt met waarde  $\lambda$  omdat gewerkt wordt met de exponentiële verdeling.

In de bovenstaande formule van de *hazard* functie  $h(t)$  wordt gebruik gemaakt van de kansdichtheidsfunctie  $f(t)$ . Deze kansdichtheidsfunctie geeft aan wat de kans is dat een bepaalde container de terminal precies op tijdstip  $t$  moet verlaten en wordt als volgt gedefinieerd:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (4)$$

De dichtheidsfunctie, de overlevingsfunctie en de kansdichtheidsfunctie zijn belangrijke data voor berekeningen in het model. Deze drie functies worden met elkaar gecombineerd om formules te creëren die te maken hebben met het vertrek van containers uit de terminal. Aan de hand van deze formules kan berekend worden hoeveel herverplaatsingen er nodig zijn en hoeveel containers aanwezig zijn in de terminal op tijdstip  $t$ .

Na het opstellen van deze functies wordt het verwachte aantal verticale herverplaatsingen voor een homogene stapel berekend. Een homogene stapel bestaat uit containers die van hetzelfde schip afkomstig zijn. Dit impliceert dat alle containers dezelfde kans hebben om de terminal te verlaten. Het maximale aantal herverplaatsingen voor een container die gepositioneerd is in een stapel met  $h$  containers is  $h - 1$ . Dit maximale aantal herverplaatsingen is nodig wanneer de onderste container van de stapel de terminal moet verlaten en al de andere containers nog in de terminal moeten blijven. Al deze containers moeten eerst verplaatst worden naar andere opslagplaatsen voordat de onderste container kan verplaatst worden om de terminal te verlaten. De bovenste container daarentegen heeft nul herverplaatsingen nodig omdat deze onmiddellijk bereikbaar is om getransporteerd te worden door de toegewezen kraan.

Het verwachte aantal herverplaatsingen (per stapel en per tijd  $t$ ) wordt vervolgens berekend. Hierbij heeft elke container een specifiek aantal herverplaatsingen nodig, afhankelijk van de verticale positie van de container. In deze formule is  $R$  het aantal mogelijke herverplaatsingen per container en  $P_R(t)$  de kans dat  $R$  herverplaatsingen nodig zijn op tijdstip  $t$ . Deze laatste factor van de onderstaande formule (5) wordt als volgt berekend:

$$E[R(t)] = \sum_{R=0}^{h-1} R \cdot P_R(t) \quad \forall t \geq 0 \quad (5)$$

De berekening van de kans dat  $R$  herverplaatsingen nodig zijn op tijdstip  $t$  wordt onderstaand toegelicht. De volgende uitdrukking, formule (6), geeft weer dat  $h-1$  herverplaatsingen nodig zijn om een bepaalde container te kunnen verplaatsen. De factor  $f(t)$  geeft de kans weer dat een container moet vertrekken op tijdstip  $t$  en de factor  $\prod_{r=1}^{h-1} S_r(t)$  geeft aan dat  $h-1$  containers aanwezig zijn in de stapel die de terminal nog niet moeten verlaten. Deze combinatie is slechts op één manier mogelijk.

$$P_{R=h-1}(t) = f(t) \prod_{r=1}^{h-1} S_r(t) = f(t)(1 - F_r)^{(h-1)} \quad (6)$$

Onderstaande formule (7) is opgesteld voor het feit dat  $h-2$  herverplaatsingen nodig zijn om een bepaalde container te kunnen verplaatsen. Deze formule (7) is namelijk de som van de uitdrukking die weergeeft dat  $h-1$  herverplaatsingen nodig zijn en de uitdrukking die weergeeft dat  $h-2$  herverplaatsingen nodig zijn om een bepaalde container te kunnen verplaatsen. Deze laatste uitdrukking kan op meer dan één manier voorkomen, nl. op  $\frac{h!}{1!(h-1)}$  manieren. Wanneer  $h-2$  herverplaatsingen nodig zijn, betekent dit dat er al één container de terminal heeft verlaten voor tijdstip  $t$ , dit wordt weergegeven door de factor  $F(t)$ . De factor  $f(t)$  geeft opnieuw aan wat de kans is dat de container weg moet op tijdstip  $t$ .

$$P_{R=h-2}(t) = f(t) \prod_{r=1}^{h-1} S_r(t) + \binom{h}{1} f(t) F(t) \prod_{r=1}^{h-2} S_r(t) \quad (7)$$

Tenslotte wordt de uitdrukking weergegeven voor wanneer slechts één herverplaatsing nodig is. Formule (8) is de som van alle verschillende mogelijkheden waarop de gebeurtenis zich kan voordoen dat de container net onder de bovenste container weg moet. Deze verschillende mogelijkheden kunnen zowel bestaan uit het feit dat er nog geen enkele container de terminal heeft verlaten vóór tijdstip  $t$  of dat er één of meer containers reeds de terminal verlaten hebben vóór tijdstip  $t$ .

$$P_{R=1}(t) = f(t) \prod_{r=1}^{h-1} S_r(t) + \binom{h}{1} f(t) F(t) \prod_{r=1}^{h-2} S_r(t) + \dots + \binom{h}{h-3} f(t) F^{(h-3)}(t) \prod_{r=1}^2 S_r(t) + \binom{h}{h-2} f(t) F^{(h-2)}(t) \prod_{r=1}^1 S_r(t) \quad (8)$$

Om dit te verduidelijken wordt gebruik gemaakt van een klein cijfervoorbeeld, waarbij de maximale stapelhoogte  $h$  gelijk is aan vier. De uitdrukking is de som van het feit dat container 3 weg moet als er 4 containers aanwezig zijn en het feit dat de middelste container weg moet als er slechts 3 containers gestapeld zijn, etc. Dit wordt analytisch als volgt weergegeven in formule (8bis):

$$P_{R=1}(t) = f(t) \prod_{r=1}^3 S_r(t) + \binom{4}{1} f(t) F(t) \prod_{r=1}^2 S_r(t) + \binom{4}{2} f(t) F^2(t) \prod_{r=1}^1 S_r(t) \quad (8bis)$$

De bovenstaande formules maken deel uit van de berekening van de verwachte waarde van het aantal herverplaatsingen voor één bepaald tijdstip  $t$ . In een terminal is het ook nodig om deze verwachte waarde te berekenen voor een langere periode. Hiervoor wordt de integraal, die terug te vinden is in formule (9), berekend van de vorige waarde  $E_i[R(t)]$ . De analytische uitdrukking die het verwachte aantal herverplaatsingen bepaalt voor een stapel van  $h$  containers van een schip  $V_i$  (met dezelfde kans om de terminal te verlaten) en dit voor een specifieke periode,  $[t_i, \infty]$ , is:

$$E_i[R] = \int_{t_i}^{\infty} E_i[R(t)] dt \quad \forall t_i \geq 0 \quad (9)$$

De berekeningen die tot nu toe verricht zijn, zijn gebaseerd op de veronderstelling dat de stapel homogeen ingedeeld is. Dit houdt in dat alle containers in de stapel van hetzelfde schip afkomstig zijn en dus dezelfde kans hebben om de stapel te verlaten op tijdstip  $t$ . Aangezien er in dit model wordt gekeken naar strategieën om containers van verschillende schepen met elkaar te combineren, dienen ook berekeningen uitgevoerd te worden voor heterogene stapels.

In tegenstelling tot de berekeningen bij homogene stapels, wordt bij de heterogene stapels de verwachte waarde van het aantal containers die gemiddeld aanwezig zijn in een stapel op tijdstip  $t$  berekend. Deze waarden kunnen variëren tussen de waarde nul wanneer de stapels leeg zijn en de waarde  $h$  wanneer de stapels volledig gevuld zijn.

In dit artikel vertrekken de auteurs van het tijdstip dat het schip  $V_{K+1}$  aankomt in de haven. De containers op dit schip moeten gecombineerd worden met de reeds aanwezige containers omdat alle  $K$  subblokken in gebruik zijn. De planners die werken op de haven moeten dus weten hoeveel containers er aanwezig zijn in elk subblok op tijdstip  $t_j$ , met  $j \geq K + 1$ . Dit aantal is nodig om de bezettingsgraad

van de subblokken te berekenen. Deze wordt namelijk bepaald door de snelheid van vertrek van containers, dewelke een exponentiële verdeling volgt met parameter  $\lambda$ , en door de tijd tussen de aankomst van twee schepen,  $\Delta T$ . Merk op dat in deze masterproef niet gewerkt wordt met de Weibull verdeling, maar met de exponentiële verdeling. Deze exponentiële verdeling wordt bekomen wanneer de waarde van parameter  $c$  gelijk wordt gesteld aan één.

Op basis van deze parameters kunnen we de kans berekenen dat er  $z$  containers aanwezig zijn in een stapel op een bepaald tijdstip  $t$ , met  $z \in [0, h]$ . Als wordt aangenomen dat alle containers afkomstig zijn van hetzelfde schip, hebben al deze containers dezelfde karakteristieken en dus ook dezelfde kans om de haven te verlaten op tijdstip  $t$ . Analytisch wordt de kans op de aanwezigheid van  $z$  containers in een stapel op tijdstip  $t$  als volgt weergegeven:

$$P_h(t) = \prod_{z=1}^h S_z(t) = \prod_{z=1}^h (1 - F_z(t)) \quad (10)$$

$$P_{h-1}(t) = \binom{h}{1} F(t) \prod_{z=1}^{h-1} S_z(t) = \left( \frac{h!}{(h-1)!} \right) F(t) \prod_{z=1}^{h-1} (1 - F_z(t)) \quad (11)$$

$$P_1(t) = \binom{h}{h-1} S(t) \prod_{z=1}^{h-1} F_z(t) = \left( \frac{h!}{(h-1)!} \right) (1 - F(t)) \prod_{z=1}^{h-1} F_z(t) \quad (12)$$

$$P_0(t) = \prod_{z=1}^h F_z(t) \quad (13)$$

De eerste formule,  $P_h(t)$ , geeft de kans weer dat de stapel maximaal bezet is. Met andere woorden geeft deze formule de kans weer dat alle containers van deze stapel de terminal niet hebben verlaten. De laatste formule,  $P_0(t)$ , daarentegen geeft de kans weer dat geen enkele container in een bepaalde stapel gestockeerd is, wat overeen komt met de kans dat alle containers de terminal verlaten hebben vóór tijdstip  $t$ . Dit zijn de twee uiterste mogelijkheden, de andere formules geven de tussenliggende mogelijkheden weer. Zo geeft de formule  $P_{h-1}(t)$  aan dewelke de kans is dat één plaats vrij is in de stapel. Dit komt overeen met de kans dat er één container reeds de terminal verlaten heeft,  $F(t)$ , vermenigvuldigd met de kans dat al de andere containers de stapel niet verlaten hebben,  $S_z(t)$ . Dit kan op  $h$  verschillende manieren. Analoog voor formule  $P_1(t)$  waar slechts één container is overgebleven in de stapel en alle overige containers al vertrokken zijn.

De distributiefunctie  $F_z(t)$  voor elk van bovenstaande formules is dezelfde voor elke container in deze stapel. Hierdoor is het mogelijk om bovenstaande uitdrukkingen te herschrijven als:

$$P_z(t) = \binom{h}{h-z} S(t)^z F(t)^{h-z} \quad (14)$$

waarbij:

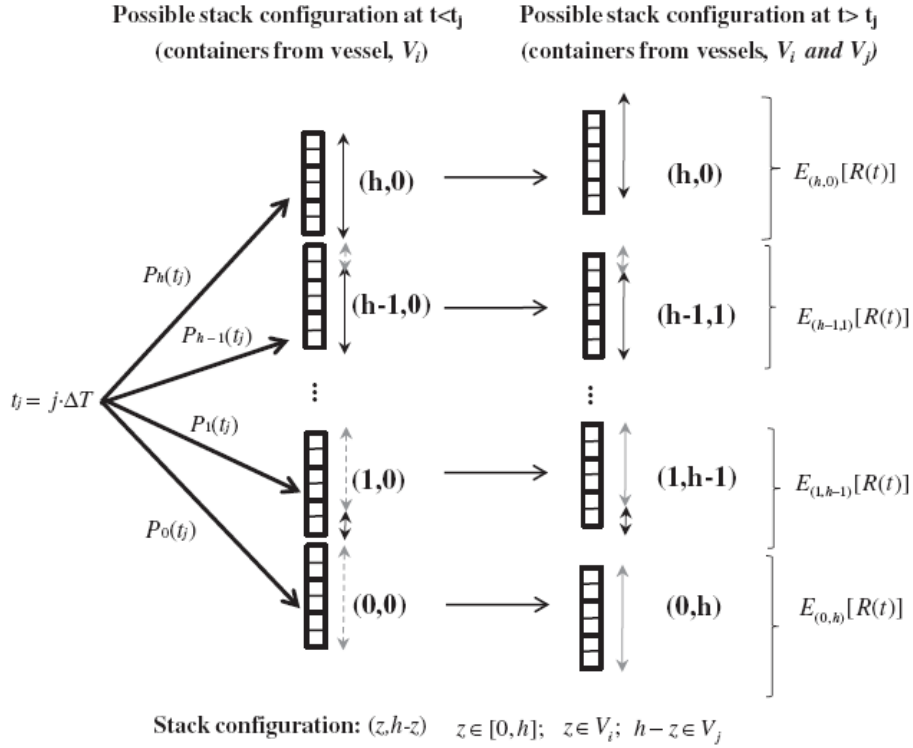
$$F_z(t) = F(t) \quad \forall z \quad (15)$$

De verwachte waarde van het aantal containers in een stapel op tijdstip  $t$  wordt analytisch weergegeven door:

$$E[H(t)] = \sum_{z=0}^h z * P_z(t) \quad \forall z[0,h] \quad (16)$$

Deze formule (16) vertoont veel gelijkennis met de formule om de verwachte waarde van het aantal herverplaatsingen te berekenen bij homogene stapels. De waarde  $R$ , het aantal herverplaatsingen, uit de vorige formule is nu vervangen door de waarde  $z$ , het aantal containers dat opgeslagen is in de stapel. De waarde  $P_z(t)$  wordt berekend zoals formule (14).

In een heterogene stapel zijn niet alle containers afkomstig van hetzelfde schip waardoor de aankomsttijden van de containers kunnen verschillen. Het is dus noodzakelijk om de bezettingsgraad van elke subblok te kennen wanneer een nieuw schip  $V_j$  aankomt op tijdstip  $t_j$ , met  $j \geq K + 1$ . De uiteindelijke configuratie van een stapel van een subblok kan bepaald worden vanaf het ogenblik dat de containers van schip  $V_j$  gestapeld zijn. Vanaf dan is het ook mogelijk om het aantal verticale herverplaatsingen van een bepaalde stapel te berekenen.



**Afbeelding 17: Mogelijke stapelconfiguratie op tijdstip  $t < t_j$  en  $t > t_j$  (Sauri & Martin, 2011)**

Bovenstaande afbeelding 18 maakt het mogelijk om een afleiding te maken van onderstaande analytische uitdrukking voor het verwacht aantal herverplaatsingen dat nodig is bij een stapel die een standaard configuratie heeft. Deze standaard configuratie van een stapel is  $(z, h-z)$ , waarbij  $z$  ( $z \in [0, h]$ ) het aantal containers zijn van schip  $V_i$  ( $i \leq K$ ) en  $h-z$  het aantal containers zijn van schip  $V_j$  ( $j \geq K+1$ ) per stapel.

$$E_{ij}[R(t)] = \sum_{z=0}^h P_z(t_j - t_i) * E_{z, h-z}[R(t)] \quad \forall t > t_j \quad (17)$$

De eerste component in deze formule ( $P_z(t_j - t_i)$ ) wordt op dezelfde manier berekend als formule (14). De kans dat een aantal herverplaatsingen gebeuren op een tijdstip  $t$  ( $P_z(t)$ ) wordt op dezelfde manier berekend als de kans dat een aantal herverplaatsingen gebeuren tussen tijdstip  $t_j$  en  $t_i$  ( $P_z(t_j - t_i)$ ). De tweede component ( $E_{z, h-z}[R(t)]$ ) bestaat uit het verwachte aantal herverplaatsingen in een stapel met  $z$  containers van schip  $V_i$  ( $i \leq K$ ) en  $h-z$  containers van schip  $V_j$  ( $j \geq K+1$ ). Om deze waarde te berekenen wordt gebruik gemaakt van formule (5).

Waarom wordt de kans dat een aantal herverplaatsingen plaatsvinden op tijdstip  $t$  op eenzelfde manier berekend als de kans dat een aantal herverplaatsingen plaatsvinden tussen tijdstip  $t_j$  en  $t_i$ ? Moet er dan geen rekening gehouden worden met het tijdstip waarop de container is aangekomen in de terminal? Hebben oudere containers niet meer kans om vroeger de terminal te verlaten dan nieuwere containers? Het antwoord op deze vraag is negatief.

Een voordeel van de veronderstelling dat de tijd, die een container doorbrengt in de terminal, een exponentiële verdeling volgt, is het feit dat geen rekening moet gehouden worden met de tijd dat een container reeds in de terminal aanwezig is. Dit wordt door de *Department of Mathematics and Statistics* van *Queen's University* de geheugenloosheid van de exponentiële verdeling genoemd (*memoryless property*). Dit houdt in dat wanneer een tijd exponentieel verdeeld is met variabele  $\lambda$  en een bepaalde activiteit nog niet heeft plaatsgevonden op een bepaald tijdstip  $t$ , de tijd tussen dat bepaald tijdstip  $t$  en het plaatsvinden van de activiteit nog steeds exponentieel verdeeld is. Hierdoor moet de tijd die reeds verstreken is niet meer onthouden worden.

Meer concreet houdt deze eigenschap in dat wanneer een container nog steeds in de terminal aanwezig is op tijdstip  $t$ , de resterende tijd die deze container doorbrengt in de terminal nog steeds een exponentiële verdeling volgt met parameter  $\lambda$ . Dit alles ongeacht het tijdstip waarop de container aangekomen is op de terminal. Dus of gekeken wordt naar  $P_2(t)$  of naar  $P_2(t_j - t_i)$ , de berekening is vrijwel dezelfde met als enig verschilpunt dat de waarde van  $t$  verschilt.

De volgende stap is dezelfde als bij de homogene stapels, nl. het berekenen van de integraal van de verwachte waarde van het aantal containers in een stapel over een periode die begint bij tijdstip  $t_j$  en loopt tot oneindig. Het uiteindelijke aantal herverplaatsingen, dat nodig is voor stapels die containers combineren van twee verschillende schepen  $V_i$  en  $V_j$ , wordt bepaald door de verwachte waarde van het aantal herverplaatsingen te integreren over de tijdsperiode  $[t_j, \infty]$ . Volgende uitdrukking geeft dit uiteindelijke aantal herverplaatsingen weer:

$$E_{ij}[R] = \int_{t_j}^{\infty} E_{ij}[R(t)] dt \quad \forall t > t_j \quad (18)$$

Nu het aantal herverplaatsingen bij homogene en heterogene stapels in een terminal gekend zijn, gaat men op zoek naar het totale aantal herverplaatsingen. Zowel verticale als horizontale herverplaatsingen maken deel uit van het totaal aantal herverplaatsingen. De bezettingsgraad van de  $K$  subblokken op het tijdstip dat de containers van schip  $V_j$  ( $j \in [K+1, N]$ ) aankomen is een belangrijke variabele in het verdere verloop van dit model.



Deze bezettingsgraad kan gedefinieerd worden aan de hand van de matrix  $\mathbf{B}$ , waarvan de componenten  $b_{m,i}$  het aantal lege plaatsen weergeeft in subblok  $i$  op tijdstip  $t_j$ . De gebruikte parameter  $m$  is ingevoerd om de notatie te vergemakkelijken aangezien  $m = j - K$  met  $m \in [1, N - K]$ .

$$\mathbf{B}_{[(N-K) \times (K)]} = \begin{bmatrix} b_{1,1} & \cdots & b_{1,K} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{(N-K),1} & \cdots & b_{(N-K),K} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Elke rij van deze matrix geeft de bezettingsgraad van het opslagterrein weer op tijdstip  $t_j$ . De kolommen van deze matrix geven elk de bezettingsgraad weer van elke blok op tijdstip  $t_j$ . De matrix bezit  $K$  kolommen en  $N - K$  rijen. Elk van deze componenten wordt berekend als volgt:

$$b_{m,i} = n - E_i[H(t_j)] * s_i \quad m = (j - K) \in [1, N - K]; j \in [K + 1, N]; i \in [1, K] \quad (20)$$

De parameter  $E_i[H(t_j)]$  uit bovenstaande uitdrukking wordt bepaald door formule (16). De parameter  $s_i$  geeft het aantal stapels weer in subblok  $i$ . Samen geven deze twee parameters het verwachte aantal containers weer die in subblok  $i$  aanwezig zijn op het tijdstip dat schip  $V_j$  arriveert op tijdstip  $t_j$ .

De bovenstaande matrix  $\mathbf{B}$  en de componenten ervan kunnen gebruikt worden om de nieuwe containers toe te wijzen aan de leegstaande plaatsen in de subblokken. Echter wordt in deze masterproef een andere methode gebruikt om de indeling van de subblokken te berekenen. De voorgestelde matrix wordt niet gebruikt en in de plaats daarvan worden de subblokken opgebouwd vanaf tijdstip nul. Dit wil zeggen dat er begonnen wordt met een lege terminal en dat de subblokken stap voor stap gevuld worden met containers. Op deze wijze wordt de indeling van de terminal per tijdstip  $t$  weergegeven en kunnen toekomstige indelingen ervan voorspeld worden. Een meer diepgaande uitleg en de praktische uitwerking van deze werkwijze worden verder toegelicht in de volgende paragraaf.

In dit model van Sauri en Martin (2011) worden drie stapelstrategieën onderling vergeleken. Om deze vergelijking mogelijk te maken, gebruikt men de parameter  $\delta_j^{s_y}$ . Deze parameter geeft het aantal subblokken weer die nodig zijn om de aankomende containers van schip  $V_j$  te plaatsen, met  $j \in [K + 1, N]$ . Hierdoor geeft deze parameter ook het aantal subblokken weer waarin containers van verschillende schepen worden opgeslagen. De waarde van  $\delta_j^{s_y}$  is vaak verschillend voor elke strategie omdat de volgorde van opvulling van de subblokken verschilt. Deze waarde verschilt niet enkel per strategie, maar ook per schip omdat de capaciteit van de subblokken afhankelijk is van de tijd  $t_j$ .

Voor elk van de strategieën  $S_y$  met  $y = \{1,2,3\}$  zal  $\delta_j^{S_y}$  volgende waarden aannemen:

$$\delta_j^{S_1} = \min_{i \in [1, K]} \left\{ i | n - \sum_{r=1}^{i-1} b_{(m+x)r} \leq b_{(m+x)i} \right\} \quad (21)$$

$$\delta_j^{S_2} = \min_{i \in [1, K]} \left\{ i | n - \sum_{r=K+2-i}^K b_{(m+x)r} \leq b_{(m+x)(K+1-i)} \right\} \quad (22)$$

$$\delta_j^{S_3} = \min_{i \in [1, K]} \left\{ b_{(m+x)(m+x)} \leq \sum_{\substack{r=K+1-i \\ r > m+x}}^K b_{(m+x)(r-x)} \right\} \quad (23)$$

De parameter  $b_{m,i}$  is afkomstig van matrix  $\mathbf{B}$  uit formule (19) waarbij  $m = j - K$  en  $x = \delta_{j-1}^{S_y}$ .

De werking van de methode gaat als volgt. Men moet eerst de matrix  $\mathbf{B}$  vervolledigen zodat het aantal lege plaatsen per subblok bekend is. Vervolgens stapelt men de inkomende containers in één van de subblokken, waarbij het eerste subblok afhankelijk is van de gekozen strategie. Bij strategie 3, moet men eerst aanwezige containers verplaatsen naar een ander subblok voordat kan begonnen worden met het stapelen van de inkomende containers.

Aangezien in deze masterproef een andere werkwijze zal gebruikt worden, die wordt toegelicht in paragraaf 5.2.6., om het aantal lege plaatsen in de container terminal te berekenen, zal de vorige stap verschillen in dit model. De indeling van elke subblok wordt weergegeven per tijdstip  $t$ , waardoor ook het aantal subblokken die gebruikt worden om containers op te slaan zichtbaar zijn. Aan de hand van deze informatie worden de waarden voor  $\delta_j^{S_y}$  berekend. Merk op dat voor de eerste  $K$  schepen die aankomen in de terminal de waarde voor  $\delta_j^{S_y}$  gelijk is aan nul omdat deze containers niet gecombineerd worden met andere containers, waarbij  $K$  het aantal subblokken weergeeft.

In de volgende stap dient de set  $C_j^{S_y}$  gedefinieerd te worden. De elementen van deze set geven de paren  $(i, j)$  weer van containers die met elkaar gecombineerd worden in een bepaalde stapel op een subblok per strategie. De analytische weergave hiervan wordt hieronder weergegeven per strategie:

$$C_j^{S_1} = \left\{ (i, j) : (1 + \delta_{j-1}^{S_1}) \leq i \leq \left( \sum_{l=K+1}^j \delta_l^{S_1} \right) \text{ and } (K+1) \leq j \leq N \right\} \quad (24)$$

$$C_j^{S_2} = \left\{ (i, j) : \left( (K+1) - \sum_{l=K+1}^j \delta_l^{S_2} \right) \leq i \leq \left( K - \sum_{l=K+1}^j \delta_{l-1}^{S_2} \right) \text{ and } (K+1) \leq j \leq N \right\} \quad (25)$$

$$C_j^{S_2} = \left\{ (i, i'); 1 \leq i \leq (N - K) \text{ and } \left( (K + 1) - \sum_{l=1}^i \delta_l^{S_2} \right) \leq i' \leq \left( K - \sum_{l=1}^i \delta_l^{S_2} \right) \right\} \quad (26)$$

De combinatie  $(i, j)$  geeft aan in welke subblok(ken) de containers van schip  $V_j$  gestockeerd worden. Merk op dat dit enkel geldt voor de eerste twee strategieën. De derde strategie geeft de combinatie  $(i, i')$  weer. De waarde  $i$  geeft opnieuw het subblok weer waar de containers van schip  $V_j$  gestockeerd worden. De waarde  $i'$  geeft het subblok weer waar de oude containers van subblok  $i$  naar verplaatst zijn, vooraleer de containers uit schip  $V_j$  kunnen opgeslagen worden in subblok  $i$ .

Wanneer elke containercombinatie is gevormd, wordt de gehele set van combinaties per strategie weergegeven als volgt:

$$C^{S_y} = C_{K+1}^{S_y} \cup \dots \cup C_j^{S_y} \dots \cup C_N^{S_y} \quad (27)$$

Na het bepalen van de containercombinaties  $(i, j)$  voor strategie 1 en 2 en containercombinaties  $(i, i')$  voor strategie 3 is het mogelijk om het aantal stapels te bepalen dat containers bevat van zowel schip  $V_i$  als schip  $V_j$  bij strategie 1 en 2. Voor strategie 3 kunnen we het aantal stapels berekenen dat vereist is om alle containers van schip  $V_i$  te plaatsen. Het hierbijhorende aantal herverplaatsingen kan berekend worden per strategie. De horizontale verplaatsingen zijn gelijk aan nul bij strategie 1 en 2 waardoor het totaal aantal herverplaatsingen bij deze strategieën gelijk is aan het aantal verticale herverplaatsingen. Bij strategie 3 is het aantal horizontale verplaatsingen gelijk aan het aantal containers dat verplaatst moeten worden van subblok  $i$  naar subblok  $i'$ .

### Strategie 1:

Nieuwe containers worden gestapeld op containers die reeds gestockeerd zijn in de terminal. Men begint bij het oudste subblok ( $i = 1$ ) en gaat maximaal verder tot subblok  $K$ .

$$E^{S_1}[R_T] = E^{S_1}[R_V] = \sum_{\substack{(i,j) \in C^{S_1} \\ j=K+1, \dots, N}} \left( \int_{t_j}^{\infty} s_{(i,j)} E_{(i,j)}[R(t)] dt \right) + \sum_{i=M^{S_1}+1}^K \left( \int_{t_1}^{\infty} s_{(i,i)} E_{(i,i)}[R(t)] dt \right) \quad (28)$$

waarbij

$$M^{S_1} = \sum_{j=1}^N \delta_j^{S_1} \quad (29)$$

**Strategie 2:**

De volgorde van de subblokken die gebruikt worden om de inkomende containers te stapelen verloopt in tegengestelde richting. Men begint bij het subblok dat het laatst is gevuld ( $i = K$ ) en eindigt bij subblok  $i = 1$  als alle subblokken nodig zijn om de inkomende containers te stockeren.

$$E^{S_2}[R_T] = E^{S_2}[R_v] = \sum_{\substack{(i,j) \in C^{S_2} \\ j=K+1, \dots, N}} \left( \int_{\bar{t}_j}^{\infty} s_{(i,j)} E_{(i,j)}[R(t)] dt \right) + \sum_{i=1}^{M^{S_2}-1} \left( \int_{\bar{t}_i}^{\infty} s_{(i,i)} E_{(i,i)}[R(t)] dt \right) \quad (30)$$

waarbij

$$M^{S_2} = \sum_{j=K+1}^N \delta_j^{S_2} \quad (31)$$

**Strategie 3:**

Deze strategie verschilt sterk van de beide overige strategieën omdat eerst (horizontale) herverplaatsingen nodig zijn vooraleer men de inkomende containers gaat stapelen. Bij deze strategie is het totaal aantal herverplaatsingen dus gelijk aan de som van de horizontale en de verticale herverplaatsingen:

$$E^{S_3}[R_T] = E^{S_3}[R_v] + E^{S_3}[R_h] \quad (32)$$

waarbij het verwacht aantal verticale herverplaatsingen gelijk is aan:

$$E^{S_3}[R_v] = \sum_{\substack{C_{1v} \in C^{S_3} \\ i=1, \dots, N-K}} \left( \int_{\bar{t}_j}^{\infty} s_{(i,i)} E_{(i,i)}[R(t)] dt \right) + \sum_{i=1}^K \left( \int_{\bar{t}_i}^{\infty} s_{(i,i)} E_{(i,i)}[R(t)] dt \right) + \sum_{j=K+1}^N \left( \int_{\bar{t}_j}^{\infty} s_{(j,j)} E_{(j,j)}[R(t)] dt \right) \quad (33)$$

De verwachte waarde van het aantal horizontale herverplaatsingen wordt berekend via volgende formule (34):

$$E^{S_3}[R_h] = E_i[H(t_j - t_i)] S_{i,i} \quad \forall i \in [1, K], j \in [K + 1, N] \quad (34)$$

In deze formule betekent  $E_i[H(t_j - t_i)]$  het verwachte aantal containers in een stapel op tijdstip  $t_j$ , rekening houdend met het feit dat de containers aangekomen zijn op tijdstip  $t_i$ . In elk van de drie

strategieën heeft de eerste term van  $E^{S_y}[R_v]$  te maken met de groep van subblokken die containers bevatten van verschillende schepen. De tweede term, in het geval van strategie 3 de tweede en derde term, slaat dan weer terug op de homogene subblokken die containers van éénzelfde schip opslaan. De analytische uitdrukking in verband met de horizontale herverplaatsingen bij strategie 3,  $E^{S_z}[R_h]$ , slaat terug op de groep van containers die opgeslagen zijn in een subblok in het eerste stadium van de strategie.

### 5.2.6. Implementatie van het analytisch model in een rekenblad

In deze paragraaf wordt de uitwerking van het bovenstaande model in een rekenblad (hier in Microsoft Office Excel) toegelicht. Het volledige model is terug te vinden in bijlage 2. Het eerste scenario is voornamelijk gebaseerd op het originele model in Sauri en Martin (2011), in het tweede daarentegen worden andere waarden verondersteld. Beide scenario's worden vervolgens onderling vergeleken om de karakteristieken van het model te bespreken.

Het rekenmodel houdt dezelfde volgorde aan als het model in het artikel. Het eerste werkblad geeft zowel de input als de output weer van het model. De input die nodig is voor dit model bestaat uit meerdere variabelen. De eerste waarde die de gebruiker van het model moet ingeven is de waarde voor de variabele  $\lambda$ , dit is de parameter van de exponentiële verdeling die de snelheid weergeeft waarmee containers de terminal verlaten. In dit model is gekozen voor de waarde 0,230 omdat deze waarde wordt gekozen in het originele model. Door deze waarde toe te kennen aan de variabele  $\lambda$ , zal de totale tijd die een container doorbrengt in de haven een verwachte waarde aannemen tussen 4 en 5 dagen. Volgens Sauri en Martin (2011) zijn dit realistische waarden voor dit type van containers in deze terminals.

De tweede waarde die moet ingevuld worden is de waarde  $t$ , het tijdstip waarop gekeken wordt naar de terminal. Een voorwaarde die moet vervuld zijn in verband met de waarde van  $t$ , is dat  $t > t_j$ . Dit betekent dat gekeken wordt na het tijdstip dat schip  $j$  is aangemeerd aan de kade, m.a.w. de containers die op dit schip stonden en moesten gelost worden in de haven zijn allen gestockeerd in de terminal. Naargelang de waarde  $t$  die gekozen wordt, hebben een verschillend aantal containers de terminal reeds verlaten.

In het eerste scenario wordt de waarde van  $t$  bepaald op 3. Dit volgt uit het feit dat tijdstip  $t_i$  als startpunt van het model gekozen is waardoor de waarde ervan vastgelegd is op nul. Net als in het originele model wordt gekozen voor  $\Delta T = 2$ , de tijd die verstrijkt tussen de aankomst van twee opeenvolgende schepen. Uit het feit dat  $t_i = 0$  en  $\Delta T = 2$  volgt dat  $t_j = 2$  omdat  $t_j = t_i + \Delta T$ . Het tweede scenario maakt gebruik van een grotere waarde voor deze variabele.

De variabele  $h$ , de hoogte van de stapels, is de derde variabele waarvoor een waarde moet gekozen worden. Net als in het eerste scenario van het originele model wordt uitgegaan van een hoogte van drie containers. Het totaal aantal containers dat kan gestockeerd worden per subblok, de variabele  $n$ , wordt vastgelegd op 180 containers. Deze waarde is dezelfde als het aantal containers dat gelost wordt van elk schip dat de haven binnenvaart en dit aantal is gelijk voor alle inkomende schepen.

De laatste waarde die moet bepaald worden, is de waarde van de variabele  $N$  die het totaal aantal schepen weergeeft die aankomen in de terminal. Deze waarde wordt gelijkgesteld aan zeven wat wil zeggen dat er zeven schepen de haven binnenvaren met telkens een tussenperiode van  $\Delta T$ .

De output die terug te vinden is op dit eerste werkblad, zijn de eindwaarden van de belangrijkste formules die hierboven beschreven werden. De eindwaarden van deze formules worden één voor één besproken in deze paragraaf. Voor de berekeningen en de waarden van de verschillende componenten moet gekeken worden naar het bijhorende werkblad. De eerste kader waarin waarden worden weergegeven zijn deze van de distributiefunctie  $F(t)$ , de kansdichtheidsfunctie  $f(t)$ , de overlevingsfunctie  $S(t)$  en de *hazard* functie  $h(t)$ . Vervolgens worden de waarden weergegeven van het aantal herverplaatsingen bij een homogene stack (formule (5)), de integraal van deze functie over periode  $[t_i, \infty]$  (formule (9)), het aantal containers aanwezig in een heterogene stapel (formule (16)) en de integraal van de verwachte waarde van het aantal herverplaatsingen in een heterogene stapel (formule (18)). Voorts is er een tabel die het totaal aantal herverplaatsingen weergeeft voor elk van de drie strategieën. Deze waarden zijn berekend via formules (28), (30) en (32). Voor strategie 3 wordt zelfs ook het aantal horizontale verplaatsingen weergegeven (formule (33)). Vervolgens worden de waarden voor  $\delta$  weergegeven voor elke waarde  $j$  en elke strategie. Deze waarden zijn berekend via formules (21), (22) en (23). Tenslotte worden de containerparen  $C_{ij}$  weergegeven op deze pagina, die berekend zijn aan de hand van formules (24), (25) en (26).

Het tweede werkblad van het excel-bestand geeft de verwachte waarde weer van het aantal onnodige verplaatsingen die nodig zijn op tijdstip  $t$  om een container te verwerken. Dit wordt weergegeven door de sommatie van het aantal verplaatsingen,  $R$ , vermenigvuldigd met de kans op dit aantal verplaatsingen,  $P_R(t)$ . Deze sommatie gebeurt van waarde 1 t.e.m. waarde  $h - 1$ , dus in het voorbeeld van scenario 1 van waarde nul t.e.m. waarde 2. De bijhorende waarden worden hieronder weergegeven in tabel 3. Wanneer er één verplaatsing minder mogelijk is, wordt een factor toegevoegd in de formule waarmee de kans op dit aantal verplaatsingen berekend wordt. Dit komt omwille van het feit dat er meerdere mogelijkheden zijn om een lager aantal verplaatsingen uit te voeren. Bovenstaand argument werd reeds toegelicht bij de formules die gebruikt worden om deze waarden te berekenen.

$R$	$P_R(t)$	$R * P_R(t)$
2	0,02902273	0,058045
1	0,115543742	0,115544

**Tabel 3: Aantal verplaatsingen en de kans dat dit aantal verplaatsingen nodig is op tijdstip  $t$  voor scenario 1.**

Merk op dat de kans op een groot aantal verplaatsingen beperkt is, in dit geval respectievelijk 2,9% en 11,5% voor twee en één verplaatsingen. Hoe groter de waarde van tijdstip  $t$ , hoe lager de kans op een groter aantal verplaatsingen. Dit heeft te maken met het feit dat de overlevingsfunctie  $S(t)$  almaar kleiner wordt naarmate  $t$  stijgt. De kans op een groot aantal verplaatsingen daalt omdat, naarmate de tijd vordert, meer containers de terminal verlaten hebben. Al deze containers die de terminal reeds verlaten hebben, kunnen geen andere containers meer blokkeren waardoor extra verplaatsingen zouden nodig zijn.

Na het berekenen van deze verwachte waarde van het aantal onnodige verplaatsingen voor één bepaald tijdstip  $t$ , wordt de verwachte waarde berekend voor een langere periode. Deze periode start op tijdstip  $t_i$  en gaat in theorie door tot oneindig. Hiervoor wordt de integraal berekend van de vorige uitkomst. Aangezien het niet mogelijk is om in excel een integraal te laten uitrekenen, moest deze eerst handmatig gereduceerd worden tot componenten die wel onder de vorm van formules kunnen ingegeven worden. Deze componenten worden snel meer uitgebreid, zoals blijkt uit onderstaande formules.

De integraal van  $P_{R=h-1}(t)$ :

$$\begin{aligned} \int_{t_i}^{\infty} f(t) * (S_r(t))^{h-1} dt &= \int_{t_i}^{\infty} \lambda * e^{-\lambda t} * e^{-\lambda t(h-1)} dt = \int_{t_i}^{\infty} \lambda * e^{-\lambda h t} dt = \lambda * \int_{t_i}^{\infty} e^{-\lambda h t} dt \\ &= \lambda * \left( -\frac{1}{\lambda h} \right) * [e^{-\lambda h t}]_{t_i}^{\infty} \\ &= -\frac{1}{h} * [e^{-\lambda h \infty} - e^{-\lambda h t_i}] = \frac{e^{-\lambda h t_i}}{h} \end{aligned}$$

De integraal van  $P_{R=h-2}(t)$ :

$$\begin{aligned} \int_{t_i}^{\infty} cte * f(t) * F(t) * (S_r(t))^{h-2} dt &= cte * \lambda * \int_{t_i}^{\infty} (1 - e^{-\lambda t}) * e^{-\lambda t(h-1)} dt = cte * \lambda * \int_{t_i}^{\infty} e^{-\lambda h t} dt * \int_{t_i}^{\infty} e^{-\lambda t(h-1)} dt \\ &= \dots = \left( cte * \left( \frac{e^{-\lambda t_i(h-1)}}{h-1} - \frac{e^{-\lambda t_i h}}{h} \right) \right) + \left( \frac{e^{-\lambda t_i h}}{h} \right) \end{aligned}$$

De integraal van  $P_{R=h-3}(t)$ :

$$\begin{aligned}
 cte * \lambda * \int_{t_1}^{\infty} (1 - e^{-\lambda t})^2 * e^{-\lambda t(h-2)} dt &= cte * \lambda * \left[ \int_{t_1}^{\infty} e^{-\lambda t(h-2)} dt - 2 * \int_{t_1}^{\infty} e^{-\lambda t(h-1)} dt + \int_{t_1}^{\infty} e^{-\lambda t h} dt \right] \\
 = \dots &= \left( cte * \left( \frac{e^{-\lambda t_1(h-2)}}{h-2} - \frac{2 * e^{-\lambda t_1(h-1)}}{h-1} + \frac{e^{-\lambda t_1 h}}{h} \right) \right) + \left( cte * \left( \frac{e^{-\lambda t_1(h-1)}}{h-1} - \frac{e^{-\lambda t_1 h}}{h} \right) \right) + \left( \frac{e^{-\lambda t_1 h}}{h} \right)
 \end{aligned}$$

De integraal van  $P_{R=h-4}(t)$ :

$$\begin{aligned}
 cte * \lambda * \int_{t_1}^{\infty} (1 - e^{-\lambda t})^3 * e^{-\lambda t(h-3)} dt \\
 = cte * \lambda * \left[ \int_{t_1}^{\infty} e^{-\lambda t(h-3)} dt - 3 * \int_{t_1}^{\infty} e^{-\lambda t(h-2)} dt + 2 * \int_{t_1}^{\infty} e^{-\lambda t(h-1)} dt - \int_{t_1}^{\infty} e^{-\lambda t h} dt \right] \\
 = \dots = \left( cte * \left( \frac{e^{-\lambda t_1(h-3)}}{h-3} - \frac{3 * e^{-\lambda t_1(h-2)}}{h-2} + \frac{3 * e^{-\lambda t_1(h-1)}}{h-1} - \frac{e^{-\lambda t_1 h}}{h} \right) \right) + \left( cte * \left( \frac{e^{-\lambda t_1(h-2)}}{h-2} - \frac{2 * e^{-\lambda t_1(h-1)}}{h-1} + \frac{e^{-\lambda t_1 h}}{h} \right) \right) \\
 + \left( cte * \left( \frac{e^{-\lambda t_1(h-1)}}{h-1} - \frac{e^{-\lambda t_1 h}}{h} \right) \right) + \left( \frac{e^{-\lambda t_1 h}}{h} \right)
 \end{aligned}$$

Het vervolg van de berekeningen van de integralen verloopt analoog met deze vier voorbeelden. De waarde voor  $cte$  varieert van kans tot kans. Zo is de waarde voor  $P_{R=h-1}(t)$  gelijk aan 1 en is de waarde voor  $P_{R=h-2}(t)$  gelijk aan  $\binom{h}{1} = \frac{h!}{1!(h-1)!} = h$ . In het berekenen van deze integralen is een patroon herkenbaar. De uitkomst van het bijgekomen deel in de oplossing wordt gevormd door de waarde  $cte$  te vermenigvuldigen met een bepaalde term. Deze term is opgebouwd uit de getallen van de driehoek van Pascal, die afwisselend positief en negatief zijn en dewelke vermenigvuldigd worden met een term  $\frac{e^{-\lambda t_1 h}}{h}$  waarbij de waarde  $h$  varieert van  $R + 1$  tot  $h$ . Bijvoorbeeld bij de integraal van  $P_{R=h-4}(t)$  variëren de waarden van  $h$  van  $R + 1 = h - 4 + 1 = h - 3$  tot  $h$ . De eindberekeningen in dit werkblad zijn analoog aan deze van het vorige werkblad. Het grote verschil tussen deze twee werkbladen zijn de kansen op een bepaald aantal verplaatsingen.

De berekeningen die tot nu toe verricht zijn, zijn gebaseerd op de veronderstelling dat de stapel homogeen ingedeeld is. Dit houdt in dat alle containers in de stapel van hetzelfde schip afkomstig zijn en dus dezelfde kans hebben om de stapel te verlaten op tijdstip  $t$ . Aangezien in dit model wordt gekeken naar strategieën om containers van verschillende schepen met elkaar te combineren, moeten ook berekeningen uitgevoerd worden voor heterogene stapels.



Bij dit type stapels wordt niet de verwachte waarde van het aantal onnodige verplaatsingen berekend, maar de verwachte waarde van het aantal containers dat gemiddeld aanwezig is in een stapel op tijdstip  $t$ . De sommatie bij deze stapels is groter dan bij homogene stapels en begint bij nul (de stapels zijn leeg) en eindigt bij waarde  $h$ , waarbij de stapels allemaal volledig gevuld zijn. De bewerkingen zijn weer analoog, al verschillen de kansen opnieuw.

De volgende stap is dezelfde als bij de homogene stapels, nl. het berekenen van de integraal van de verwachte waarde van het aantal containers in een stapel over een periode die begint bij tijdstip  $t_j$  en loopt tot oneindig. Deze verwachte waarde bestaat uit het verwachte aantal onnodige verplaatsingen vermenigvuldigd met de kans dat dit aantal herverplaatsingen voorkomt tussen tijdstip  $t_j$  en  $t_i$ . De kans dat een aantal herverplaatsingen gebeuren op een tijdstip  $t$  wordt op dezelfde manier berekend als de kans dat een aantal herverplaatsingen gebeuren tussen tijdstip  $t_j$  en  $t_i$ . Zoals reeds aangehaald komt dit door de *memoryless property* of geheugenloosheid van de exponentiële verdeling. Dus of gekeken wordt naar  $P_2(t)$  of naar  $P_2(t_j - t_i)$ , de berekening is vrijwel dezelfde. In het model is de berekening van de waarde van  $E_{ij}[R(t)]$  zichtbaar in werkblad 'Value Eij[R(t)]'. De berekening van de integraal van deze waarde is terug te vinden op het volgende werkblad. De uitkomst van dit werkblad is gelijk aan de waarde die terug te vinden is in de output.

Het volgende punt in dit model verschilt licht van het originele model. Wegens een gebrek aan data was het niet mogelijk om de voorgestelde formule, om het aantal vrije opslagplaatsen in de verschillende subblokken te berekenen, te gebruiken zoals weergegeven in het originele model. Daarom wordt in deze masterproef een andere manier gebruikt om de indeling van de subblokken te berekenen.

De werking van deze nieuwe methode is analoog voor de drie strategieën, enkel de volgorde van het stockeren varieert naargelang de gebruikte strategie. De werkbladen 6, 7 en 8 geven allen hetzelfde type output weer. Ten eerste is de opdeling van het subblok zichtbaar, zowel voor de voorbije, de huidige en de toekomstige perioden. Dit moet wel grotendeels handmatig ingegeven worden door de gebruiker van het model, al worden verschillende formules gebruikt en data weergegeven om het ingeven van de data te vergemakkelijken. Om de huidige opdeling van het subblok weer te geven, is gekozen om het subblok van nul op te bouwen en vervolgens met deze data verder te werken. Dit in tegenstelling tot de bovenvermelde matrix **B**. Wanneer er in de realiteit gegevens bekend zijn omtrent het aantal containers per subblok, kunnen deze natuurlijk ook ingegeven worden in het model.

Zoals bovenvermeld wordt in dit model uitgegaan van  $n = 180$  en  $\Delta t = 2$ . De manier waarop het verwachte aantal containers in één stapel op een bepaald tijdstip  $t$  berekend wordt is reeds uitgelegd. Wanneer deze waarde vermenigvuldigd wordt met het aantal stapels in een subblok, bekomt dit model

het verwachte aantal containers per subblok op tijdstip  $t$ . Omdat bepaald is dat  $n = 180$  en  $h = 3$  kan het aantal stapels,  $s_i$ , per subblok berekend worden via volgende formule:

$$s_i = \frac{n}{h}$$

Zoals weergegeven in het originele model is het verwachte aantal vrije opslagplaatsen voor containers gelijk aan het totaal aantal plaatsen vermindert met het verwachte aantal bezette plaatsen per subblok. Deze laatste term wordt bekomen door de waarde van  $E_i[H(t)]$  te vermenigvuldigen met  $s_i$ . Deze berekening is zichtbaar onder 'Calculations' op de werkbladen.

Het aantal containers per subblok daalt naargelang de waarde van  $t$  groter wordt. De gestockeerde containers verlaten de terminal aan een bepaalde ritme  $\lambda$  per tijdseenheid. Linksbovenaan in elk van de drie werkbladen is het aantal overgebleven containers na elk tijdstip  $t$  aangegeven voor  $n = 180$  en  $\Delta t = 2$ . Deze waarden kunnen op twee manieren berekend worden a.d.h.v. de formule die gebruikt wordt bij de berekening van het verwachte aantal aanwezige containers in heterogene stapels. De eerste manier houdt in dat de waarde van  $n$  vastgelegd wordt en de waarde  $t$  varieert. De andere manier om dit te berekenen bestaat uit het telkens opnieuw invullen van de nieuw bekomen waarde van  $n$  en de waarde van  $t$  constant te houden. Op afrondingsverschillen na bekomen beide berekeningen hetzelfde resultaat.

De tweede berekeningswijze is een hulpmiddel om het aantal containers te berekenen dat in het subblok aanwezig is bij de aankomst van het volgende schip. De eerste vijf aankomsten zijn dezelfde voor elk van de drie strategieën. Deze schepen plaatsen hun te lossen containers elk in een volgend subblok waardoor, na het lossen van het vijfde schip, in elk subblok containers aanwezig zijn. Merk op dat het aantal subblokken in dit scenario vastgelegd is op vijf subblokken. De eerste vijf ladingen worden weergegeven in onderstaande tabel 4, waarbij de waarde links in de kolommen overeenstemt met het aantal containers dat reeds in het subblok aanwezig was. De waarde aan de rechterzijde in elke kolom geeft het aantal nieuwe containers weer.

<b>t</b>	<b>i</b>	<b>1</b>		<b>2</b>		<b>3</b>		<b>4</b>		<b>5</b>	
0	1	0	<b>180</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
2	2	114	0	0	<b>180</b>	0	0	0	0	0	0
4	3	72	0	114	0	0	<b>180</b>	0	0	0	0
6	4	45	0	72	0	114	0	0	<b>180</b>	0	0
8	5	28	0	45	0	72	0	114	0	0	<b>180</b>

**Tabel 4: De eerste vijf ladingen in een terminal met vijf subblokken**

Vervolgens moeten de containers van het zesde schip toegewezen worden aan een subblok. Bij strategie 1 betekent dit dat subblok 1 wordt opgevuld tot deze volzet is, waarna de rest van de

containers gestapeld worden in subblok 2. Een andere manier van stockeren gebeurt bij strategie 2 waarbij eerst de laatst gevulde subblokken worden aangevuld, in dit scenario zijn hiervoor drie subblokken nodig. Als eerste wordt subblok 5 aangevuld om vervolgens subblokken 4 en 3 verder aan te vullen tot alle containers van schip 6 opgeslagen zijn op de terminal. Strategie 3 tenslotte verplaatst eerst de overgebleven containers van subblok 1 naar subblok 5. Indien nodig wordt subblok 4 ook gebruikt om dit aantal containers op te slaan. Na deze horizontale verplaatsingen wordt het nu lege eerste subblok integraal opgevuld met de lading van het zesde schip.

Uit bovenstaande alinea wordt duidelijk dat niet elke strategie evenveel subblokken nodig heeft om de lading van het schip te stockeren op de terminal. In het originele model geven de auteurs een formule weer die dit aantal subblokken berekent. Door het feit dat de volledige opdeling van de subblokken is weergegeven, kunnen het aantal vereiste subblokken om de lading te stockeren afgelezen worden uit de tabel. Wanneer de rechterwaarde van elke kolom groter is dan nul, wordt een waarde 1 toegekend aan deze subblok. De som over alle subblokken per tijdstip  $t$  geeft de waarde  $\delta_j^{S_y}$  met  $y = \{1,2,3\}$ .

Een opmerking bij deze waarden voor  $\delta$  is het feit dat in het originele artikel wordt uitgegaan van het feit dat  $\delta_{j-1}^{S_y}$  gelijk is aan nul. In het artikel wordt hiermee bedoeld dat  $\delta_j^{S_y} = 0$  voor alle waarden  $j$  waarvoor de containers niet gecombineerd moeten worden in een subblok met deze van een ander schip. In navolging van deze veronderstelling, worden in deze masterproef de waarden van  $\delta_j^{S_y}$  met  $j = \{1,2,3,4,5\}$  gelijk gesteld aan nul omdat  $K = 5$ . Indien de waarde van  $K$  verandert, veranderen de waarden  $j$  die gelijk gesteld worden aan nul ook. Algemeen kan geschreven worden dat  $\delta_j^{S_y} = 0$  voor  $j = \{1, \dots, K\}$ . Deze veronderstelling is nodig om de containerparen  $C_j^{S_y}$  correct te kunnen vormen.

Deze containerparen geven voor de eerste twee strategieën weer welke subblokken  $i$  gebruikt worden om de lading van schip  $j$  op te slaan. Zo betekent  $C_6^{S_1} = \{(1,6), (2,6)\}$  in dit voorbeeld dat de containers van schip 6 verdeeld zijn over subblok 1 en 2 wanneer strategie 1 gebruikt wordt. De derde strategie geeft een ander type containerparen weer. De eerste waarde geeft opnieuw aan waar de containers van schip  $i$  opgeslagen liggen. De tweede waarde daarentegen geeft aan waar de oorspronkelijke containers van subblok  $i$  naartoe worden verplaatst, zodat deze subblok  $i$  leeg wordt gemaakt voor de containers van het laatste aangemeerde schip. De nieuwe opslagplaats voor deze containers wordt subblok  $i'$  genoemd. Zo betekent  $C_6^{S_3} = (1,5)$  dat de containers van subblok 1 worden verplaatst naar subblok 5 waarna de lading van schip 6 kan geplaatst worden in subblok 1.

Na al deze waarden berekend te hebben, blijft nog slechts één berekening over in dit model: het totaal aantal herverplaatsingen per strategie. Opnieuw zijn de berekeningen voor strategie 1 en 2 quasi dezelfde. Voor beide strategieën zijn er enkel verticale verplaatsingen en geen horizontale verplaatsingen, deze laatste zijn enkel aanwezig bij de derde strategie. Een meer diepgaande

bespreking wordt gegeven bij de uitleg van de beide scenario's waar kan verwezen worden naar de output van het model om de uitleg te verduidelijken.

### 5.2.7. Vergelijking van alternatieve scenario's

In bovenstaande paragraaf werden enkele waarden toegelicht voor het eerste scenario. In deze paragraaf worden de inputdata en de bijhorende output van de twee scenario's met elkaar vergeleken.

#### 5.2.7.1. Scenario 1

De inputwaarden van het eerste scenario worden weergegeven in onderstaande tabel 5.

<i>Data</i>	<i>Waarde</i>
$\lambda =$	0,23
$t =$	3
$h =$	3
$n =$	180
$t_j =$	2
$t_i =$	0
$\Delta T =$	2
$j =$	6
$K =$	5
$N =$	7

**Tabel 5: Overzicht van de inputdata voor scenario 1**

Deze waarden zijn reeds besproken in de vorige paragraaf en komen grotendeels overeen met de data in het oorspronkelijke model. Enkel de data omtrent de tijden wordt niet expliciet weergegeven in het oorspronkelijke model. Merk op dat de aankomst van het vijfde schip gezien wordt als tijdstip 0 in dit scenario.

Met deze inputwaarden worden volgende outputwaarden verkregen. Als eerste worden de functiewaarden besproken. De kans dat een container vóór tijdstip  $t$  de terminal verlaat is ongeveer 50% en de kans dat een container precies op tijdstip  $t$  de terminal verlaat is 11,5%. De waarde voor  $h(t)$  is zoals eerder besproken gelijk aan de waarde van  $\lambda$  die in dit scenario gelijk is aan 0,230.

<i>Data</i>	<i>Value</i>
$F(t) =$	0,4984
$f(t) =$	0,1154
$S(t) =$	0,5016
$h(t) =$	0,2300

**Tabel 6: Overzicht van de functiewaarden voor tijdstip  $t$  voor scenario 1**

De verwachte waarde van het aantal herverplaatsingen komt neer op **0,1736** wat wil zeggen dat nauwelijks containers moeten verplaatst worden gemiddeld gekeken. Dit lijkt vreemd op het eerste zicht, maar wanneer de kansen worden bekeken op het aantal mogelijke herverplaatsingen is merkbaar dat er slechts **14,4%** kans op één of meerdere herverplaatsingen in dit geval. De integraal van deze waarde geeft de waarde **0,3774** die het lange termijn-gemiddelde aantal herverplaatsingen weergeeft voor een stapel met 3 containers die afkomstig zijn van schip  $V_i$  voor een specifieke periode  $[t_i, \infty]$ . Opnieuw wordt dezelfde conclusie getrokken dat er gemiddeld genomen geen containers moeten verplaatst worden.

<i>Data</i>	<i>Value</i>	<i>Data</i>	<i>Value</i>
$E[R(t)] =$	0,1736	$\text{Integral}(E[R(t)]dt) =$	0,3774

**Tabel 7: De verwachte waarde en gemiddelde waarde van het aantal herverplaatsingen op tijdstip  $t$  voor homogene stapels in scenario 1**

Voor de heterogene stapels worden gelijkaardige waarden gevonden voor dit scenario. Het verwachte aantal containers in de stapel op tijdstip  $t$  is **1,5047**, wat in realiteit wil zeggen dat er ofwel één ofwel twee container(s) in de stapel aanwezig zijn op tijdstip 3. Als gevolg zullen bijna geen herverplaatsingen nodig zijn. Dit blijkt ook uit de lage waarde van **0,5839** voor het verwachte aantal herverplaatsingen.

<i>Data</i>	<i>Value</i>	<i>Data</i>	<i>Value</i>
$E[H(t)] =$	1,5047	$\text{Integral}(E_{ij}[R(t)]dt) =$	0,5839

**Tabel 8: Het verwachte aantal containers en gemiddelde waarde van het aantal herverplaatsingen op tijdstip  $t$  voor heterogene stapels in scenario 1**

Uit deze resultaten blijkt nogmaals dat hoe lager de maximale stapelhoogte is, hoe minder aantal herverplaatsingen vereist zijn. Het is logisch dat minder onnodige verplaatsingen nodig zijn indien minder containers aanwezig zijn die andere containers kunnen belemmeren.

*Delta for each strategy and for each j:*

<i>j</i>	S1	S2	S3
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0
6	2	3	1
7	2	3	1
8	2	3	1
9	2	3	1
10	2	3	1

**Tabel 9: De waarden voor  $\delta_j^{S_y}$  voor elke waarde  $j = \{1, \dots, 10\}$  en voor elke strategie**

Een volgende variabele die besproken wordt is  $\delta_j^{S_y}$ , waarvan de waarden weergegeven worden in bovenstaande tabel 9. De eerste vijf waarden hebben bij de drie strategieën de waarde nul omwille van de reden die eerder is aangehaald, nl. omdat deze containers niet gecombineerd worden met andere containers. Het is duidelijk zichtbaar dat de eerste strategie minder subblokken nodig heeft om het aantal containers op te slaan dan strategie 2. De verklaring hiervoor is dat de 'oudste' subblokken, waar containers het langst opgeslagen worden, meer ruimte hebben dan 'nieuwe' subblokken, waar containers nog maar net zijn gestockeerd. Om een beter beeld te krijgen hierover, wordt de indeling van de containers volgens respectievelijk strategie 1 en strategie 2 weergegeven hieronder in tabel 10 en tabel 11.

<i>t</i>	<i>j</i>	1		2		3		4		5	
	1	0	180	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	114	0	0	180	0	0	0	0	0	0
	3	72	0	114	0	0	180	0	0	0	0
	4	45	0	72	0	114	0	0	180	0	0
0	5	28	0	45	0	72	0	114	0	0	180
2	6	18	162	28	18	45	0	72	0	114	0
4	7	114	0	29	151	32	29	45	0	72	0
6	8	72	0	114	0	39	141	28	39	45	0
8	9	45	0	72	0	114	0	42	138	28	42
10	10	28	44	45	0	72	0	114	0	44	136

**Tabel 10: De opdeling van de verschillende subblokken voor strategie 1 in scenario 1**

<i>t</i>	<i>j</i>	1		2		3		4		5	
	1	0	180	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	114	0	0	180	0	0	0	0	0	0
	3	72	0	114	0	0	180	0	0	0	0
	4	45	0	72	0	114	0	0	180	0	0
0	5	28	0	45	0	72	0	114	0	0	180
2	6	18	0	28	0	45	6	72	108	114	66
4	7	11	0	18	0	32	48	114	66	114	66
6	8	7	0	11	0	51	48	114	66	114	66
8	9	4	0	7	0	62	48	114	66	114	66
10	10	3	0	4	0	69	48	114	66	114	66

**Tabel 11: De opdeling van de verschillende subblokken voor strategie 2 in scenario 1**

Omdat bij scenario 1 telkens meer dan 100 containers kunnen gestockeerd worden in één subblok, heeft deze strategie minder subblokken nodig om alle containers te stockeren. Bij strategie 2 zijn er telkens drie subblokken nodig om het totaal aantal containers te stockeren omdat in het eerste subblok waar containers worden bijgevoerd slechts 66 containers kunnen opgeslagen worden.

Strategie 3 daarentegen heeft telkens slechts één subblok nodig om het aantal containers op te slaan. Dit is het gevolg van het feit dat slechts een beperkt aantal containers aanwezig zijn in een subblok op het ogenblik dat dit subblok geselecteerd wordt om containers in op te slaan. Want deze containers, die in het gekozen subblok aanwezig zijn, worden verplaatst naar de laatst bijgevoerde subblok(ken). In dit scenario is telkens slechts één subblok nodig om de 'oude' containers heen te transporteren. Ook voor deze strategie wordt de opdeling weergegeven in onderstaande tabel 12.

<i>t</i>	<i>j</i>	1		2		3		4		5	
	1	0	180	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	114	0	0	180	0	0	0	0	0	0
	3	72	0	114	0	0	180	0	0	0	0
	4	45	0	72	0	114	0	0	180	0	0
0	5	28	0	45	0	72	0	114	0	0	180
2	6	0	180	28	0	45	0	72	0	114	18
4	7	114	18	0	180	28	0	45	0	83	0
6	8	83	0	114	18	0	180	28	0	52	0
8	9	52	0	83	0	114	18	0	180	33	0
10	10	33	0	52	0	83	0	114	21	0	180

**Tabel 12: De opdeling van de verschillende subblokken voor strategie 3 in scenario 1**

In tabel 13 worden de combinaties  $c_j^{s_y}$  weergegeven. De betekenis van deze combinaties is eerder toegelicht in deze masterproef in paragraaf 5.2.5. Uit deze tabel kunnen ook de waarden van  $\delta_j^{s_y}$  afgelezen worden, want de waarde van  $\delta_j^{s_y}$  is gelijk aan het aantal containerparen voor elke waarde *j* en voor elke strategie.

<i>j</i>	<i>S1</i>		<i>S2</i>			<i>S3</i>
1	(1,1)		(1,1)			
2	(2,2)		(2,2)			
3	(3,3)		(3,3)			
4	(4,4)		(4,4)			
5	(5,5)		(5,5)			
6	(1,6)	(2,6)	(3,6)	(4,6)	(5,6)	(1,5)
7	(2,7)	(3,7)	(3,7)	(4,7)	(5,7)	(2,1)
8	(3,8)	(4,8)	(3,8)	(4,8)	(5,8)	(3,2)
9	(4,9)	(5,9)	(3,9)	(4,9)	(5,9)	(4,3)
10	(1,10)	(5,10)	(3,10)	(4,10)	(5,10)	(5,4)

**Tabel 13: De combinaties  $C_j^{S_j}$  voor elke waarde  $j = \{1, \dots, 10\}$  en voor elke strategie**

De laatste tabel die wordt besproken in dit scenario geeft het totaal aantal verwachte herverplaatsingen weer per strategie. In tabel 14 wordt de verwachte waarde weergegeven voor het aantal herverplaatsingen voor strategie 1. Deze waarden zijn berekend aan de hand van formule (28). De eerste integraal in deze formule wordt gesommeerd voor de waarden  $j = 6$  en  $j = 7$ , aangezien de waarde  $j = K + 1, \dots, N$  met  $K = 5$  en  $N = 7$  in dit scenario. De sommatie van de tweede integraal bestaat slechts uit één term, omwille van het feit dat de waarde van  $M^{S_1} = 4$ , berekend via formule (29). De sommatie gebeurt van waarde  $M^{S_1} + 1$  tot waarde  $K$ , in dit scenario zijn beide waarden gelijk aan vijf. Het resultaat van de som van deze twee integralen is **105,103**, waaruit blijkt dat op lange termijn 105 herverplaatsingen nodig zijn wanneer strategie 1 wordt gebruikt.

**Strategy 1: 105,103**

$E[Rv]$	70,0690	35,03448
$E[Rh]$	0	0
$E[RT]$	70,0690	35,03448

**Tabel 14: Het verwachte aantal herverplaatsingen voor strategie 1 in scenario 1**

Voor tabel 15 is een analoge bespreking mogelijk, aangezien deze tabel het totaal aantal herverplaatsingen weergeeft voor strategie 2. Opnieuw geldt het feit dat geen horizontale verplaatsingen aanwezig zijn in deze strategie, zoals reeds uitgelegd is in paragraaf 5.2.6. De eerste integraal wordt net als bij strategie 1 gesommeerd over de waarden  $j = 6$  en  $j = 7$ . De tweede integraal wordt echter gesommeerd over een waarde vijf aangezien  $M^{S_2} = \delta_6^{S_2} + \delta_7^{S_2} = 3 + 3 = 6$  en de integraal wordt gesommeerd over de waarden  $i = 1, \dots, (M^{S_2} - 1) = 1, 2, 3, 4, 5$ . Beide integralen worden weergegeven in formule (30). Vandaar de hogere verwachte waarde van het totaal aantal herverplaatsingen voor strategie 2.



**Strategy 2: 245,241**

$E[Rv]$	70,0690	175,1724
$E[Rh]$	0	0
$E[RT]$	70,0690	175,1724

**Tabel 15: Het verwachte aantal herverplaatsingen voor strategie 2 in scenario 1**

De verwachte waarde van het totaal aantal herverplaatsingen voor strategie 3 wordt weergegeven in tabel 16 en bestaat uit de som van de verwachte waarde van het aantal verticale verplaatsingen (formule (32)) en de verwachte waarde van het aantal horizontale verplaatsingen (formule (33)). Het verwachte aantal horizontale verplaatsingen is gelijk aan het aantal intern te transporteren containers van subblok  $i$  naar subblok  $i'$ , in dit scenario is deze waarde gelijk aan 18. Het verwachte aantal verticale verplaatsingen bestaat uit de som van drie integralen, die elk op zich een aantal keer gesommeerd worden. De eerste integraal wordt twee keer gesommeerd omdat de waarde  $i = 1, \dots, (7 - 5) = 1, 2$ , de tweede integraal wordt gesommeerd van  $i = 1$  t.e.m.  $i = K = 5$  en de derde integraal wordt gesommeerd voor de waarden  $j = 6$  en  $j = 7$ , twee keer dus. In totaal geeft dit een waarde van ongeveer 270 verplaatsingen.

**Strategy 3: 270,248**

$E[Rv]$	7,006895	175,1724	70,06895
$E[Rh]$	18		
$E[RT]$	25,0069	175,1724	70,06895

**Tabel 16: Het verwachte aantal herverplaatsingen voor strategie 3 in scenario 1**

### 5.2.7.2. Scenario 2

De inputwaarden van het tweede scenario worden weergegeven in onderstaande tabel.

<i>Data</i>	<i>Waarde</i>
$\lambda =$	0,23
$t =$	7
$h =$	3
$n =$	180
$t_j =$	6
$t_i =$	4,5
$\Delta T =$	1,5
$j =$	9
$K =$	5
$N =$	10

**Tabel 17: Overzicht van de inputdata voor scenario 2**

Slechts vier variabelen hebben dezelfde waarde in vergelijking met scenario 1, nl. de waarden voor  $\lambda$ ,  $h$ ,  $n$  en  $K$ . De waarde  $t$  is verhoogd van 3 naar 7, om zo te achterhalen hoe het model verder in de tijd werkt. De waarde van  $\Delta T$  (in dagen) is verlaagd van 2 naar 1,5, zodat er minder tijd is tussen twee aankomsten van schepen. Aangezien de waarden van  $t$  en  $\Delta T$  veranderd zijn, verschillen ook de waarden voor  $t_j$  en  $t_i$ . Een andere waarde die verschilt om dat de waarde van  $t$  veranderd is, is deze voor variabele  $j$ . Op tijdstip 7 is het negende schip als laatste aangekomen in de terminal, vandaar de aanpassing. De waarde van  $N$  moet ook vergroot worden naar een waarde 10 omdat in scenario 1 wordt aangenomen dat er slechts 7 schepen arriveren. De opmerking in verband met het feit dat de aankomst van het vijfde schip gezien wordt als tijdstip 0, geldt ook in dit scenario.

Met deze inputwaarden worden volgende functiewaarden verkregen. De kans dat een container voor tijdstip  $t$  de terminal verlaat is ongeveer 80% en de kans dat een container precies op tijdstip  $t$  de terminal verlaat is 4,6%. De waarde voor  $h(t)$  blijft zoals eerder besproken gelijk aan de waarde van lambda die in dit scenario opnieuw gelijk is aan 0,230.

<i>Data</i>	<i>Value</i>
$F(t) =$	0,8001
$f(t) =$	0,0460
$S(t) =$	0,1999
$h(t) =$	0,2300

**Tabel 18: Overzicht van de functiewaarden voor tijdstip  $t$  voor scenario 2**

Zowel voor de verwachte waarde van het aantal herverplaatsingen als voor de integraal van deze waarde is de uitleg gelijkaardig aan de uitleg bij scenario 1. Dezelfde conclusie wordt getrokken uit de waarden van deze variabelen, nl. dat, gemiddeld genomen, geen containers moeten verplaatst worden op tijdstip  $t$  en over een periode  $[t_i, \infty]$ .

<i>Data</i>	<i>Value</i>	<i>Data</i>	<i>Value</i>
$E[R(t)] =$	0,0276	$Integral (E[R(t)]dt) =$	0,0599

**Tabel 19: De verwachte waarde en gemiddelde waarde van het aantal herverplaatsingen op tijdstip  $t$  voor homogene stapels in scenario 2**

Voor de heterogene stapels worden lagere waarden gevonden in dit scenario. Het verwachte aantal containers in de stapel op tijdstip  $t$  ligt in dit scenario tussen nul containers en één container, met als gevolg dat er bijna geen herverplaatsingen nodig zijn.

<i>Data</i>	<i>Value</i>	<i>Data</i>	<i>Value</i>
$E[H(t)] =$	0,5997	$\text{Integral}(E_{ij}[R(t)]dt) =$	0,0654

**Tabel 20: Het verwachte aantal containers en gemiddelde waarde van het aantal herverplaatsingen op tijdstip  $t$  voor heterogene stapels in scenario 1**

Het verhogen van tijdstip  $t$  en het verkleinen van de waarde voor  $\Delta T$  hebben weinig effect gehad op de net besproken waarden. Enkel de functiewaarden hebben nu een erg verschillende waarde in vergelijking met scenario 1.

$j$	S1	S2	S3
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0
6	2	3	1
7	2	3	1
8	2	3	1
9	2	4	1
10	2	4	1

**Tabel 21: De waarden voor  $\delta_j^S$  voor elke waarde  $j = \{1, \dots, 10\}$  en voor elke strategie**

In tabel 21 is enkel een verschil merkbaar tussen beide scenario's bij strategie 2, waar er nu voor schip 9 en 10 zelfs vier subblokken nodig zijn om de containers te kunnen opslaan in tegenstelling tot de drie subblokken die nodig waren bij scenario 1. Zo wordt het verschil tussen strategie 1 en 2 alleen maar groter. De indeling van de subblokken voor strategie 1 en 2 worden hieronder weergegeven.

$t$	$j$	1		2		3		4		5	
<b>0</b>	<b>1</b>	0	<b>180</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
	<b>2</b>	127	0	0	<b>180</b>	0	0	0	0	0	0
	<b>3</b>	90	0	127	0	0	<b>180</b>	0	0	0	0
	<b>4</b>	64	0	90	0	127	0	0	<b>180</b>	0	0
	<b>5</b>	45	0	64	0	90	0	127	0	0	<b>180</b>
<b>1,5</b>	<b>6</b>	32	<b>148</b>	45	<b>32</b>	64	0	90	0	127	0
<b>3</b>	<b>7</b>	127	0	55	<b>125</b>	45	55	64	0	90	0
<b>4,5</b>	<b>8</b>	90	0	127	0	71	<b>109</b>	45	<b>71</b>	64	0
<b>6</b>	<b>9</b>	64	0	90	0	127	0	82	<b>98</b>	45	<b>82</b>
<b>7,5</b>	<b>10</b>	45	<b>90</b>	64	0	90	0	127	0	90	<b>90</b>

**Tabel 22: De opdeling van de verschillende subblokken voor strategie 1 in scenario 2**

<i>t</i>	<i>j</i>	1		2		3		4		5	
	1	0	180	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	127	0	0	180	0	0	0	0	0	0
	3	90	0	127	0	0	180	0	0	0	0
	4	64	0	90	0	127	0	0	180	0	0
0	5	45	0	64	0	90	0	127	0	0	180
1,5	6	32	0	45	0	64	37	90	90	127	53
3	7	23	0	32	0	72	74	127	53	127	53
4,5	8	16	0	23	0	103	74	127	53	127	53
6	9	11	0	16	19	125	55	127	53	127	53
7,5	10	8	0	25	21	127	53	127	53	127	53

**Tabel 23: De opdeling van de verschillende subblokken voor strategie 2 in scenario 2**

Bij strategie 1 is een stijgende trend zichtbaar, in tabel 18, met betrekking tot het aantal containers in de subblokken die nodig zijn om alle containers te stapelen. Voor het geval  $j = 10$  zijn 135 containers aanwezig in subblok 1. Het is een kwestie van tijd vooraleer strategie 1 ook drie subblokken nodig heeft om alle containers te stockeren. Nochtans blijft het aantal subblokken dat strategie 2 nodig heeft om alle containers te stapelen groter dan het aantal subblokken dat strategie 1 gebruikt voor hetzelfde aantal containers.

Voor strategie 3 verandert enkel het aantal te verplaatsen containers van het subblok waar de nieuwe containers worden opgeslagen naar het laatst bijgevulde subblok. In onderstaande tabel 24 is de indeling zichtbaar van de subblokken voor deze strategie.

$t$	$j$	1		2		3		4		5	
	1	0	180	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	127	0	0	180	0	0	0	0	0	0
	3	90	0	127	0	0	180	0	0	0	0
	4	64	0	90	0	127	0	0	180	0	0
0	5	45	0	64	0	90	0	127	0	0	180
1,5	6	0	180	45	0	64	0	90	0	127	32
3	7	127	32	0	180	45	0	64	0	113	0
4,5	8	113	0	127	32	0	180	45	0	80	0
6	9	80	0	113	0	127	32	0	180	57	0
7,5	10	57	40	80	0	113	0	127	32	0	180

**Tabel 24: De opdeling van de verschillende subblokken voor strategie 3 in scenario 2**

In tabel 25 worden de combinaties  $c_j^{S_2}$  weergegeven. Merk op dat bij de tweede strategie (de kolom onder  $S_2$ ) een vierde kolom is toegevoegd omdat voor  $j = \{9,10\}$  de waarde  $\delta_j^{S_2}$  gelijk is aan 4.

$j$	$S_1$		$S_2$				$S_3$
1	(1,1)		(1,1)				
2	(2,2)		(2,2)				
3	(3,3)		(3,3)				
4	(4,4)		(4,4)				
5	(5,5)		(5,5)				
6	(1,6)	(2,6)	(5,6)	(4,6)	(3,6)		(1,5)
7	(2,7)	(3,7)	(5,7)	(4,7)	(3,7)		(2,1)
8	(3,8)	(4,8)	(5,8)	(4,8)	(3,8)		(3,2)
9	(4,9)	(5,9)	(5,9)	(4,9)	(3,9)	(2,9)	(4,3)
10	(1,10)	(5,10)	(5,10)	(4,10)	(3,10)	(2,10)	(5,4)

**Tabel 25: De combinaties  $c_j^{S_2}$  voor elke waarde  $j = \{1, \dots, 10\}$  en voor elke strategie**

Tabel 26, 27 en 28 geven de verwachte waarde weer voor het totaal aantal herverplaatsingen per strategie voor scenario 2. De bespreking van deze drie tabellen verloopt analoog met de bespreking van tabellen 14, 15 en 16. Merk op dat in dit scenario de waarde van  $N$  verhoogd is tot 10.

Bij strategie 1 wordt de eerste integraal gesommeerd over de waarden  $j = K + 1, \dots, N = 6, 7, 8, 9, 10$ . Omwille van de verhoging van de waarde voor variabele  $N$  van 7 naar 10, komen dubbel zoveel schepen aan als aanwezige subblokken. Dit heeft als gevolg dat bij de drie onderstaande tabellen, verschillende integralen gesommeerd worden over een waarde vijf, zowel voor  $i = 1, \dots, K$  als voor  $j = K + 1, \dots, N$ . Dit is de reden waarom bij strategie 1 de uitkomsten van de twee integralen dezelfde zijn.

**Strategy 1: 39,2413**

$E[Rv]$	19,6207	19,6207
$E[Rh]$	0	0
$E[RT]$	19,6207	19,6207

**Tabel 26: Het verwachte aantal herverplaatsingen voor strategie 1 in scenario 2**

Bij strategie 2 heeft de uitkomst van de eerste integraal dezelfde waarde als bij strategie 1 en wordt de tweede integraal gesommeerd over een waarde 16. Deze grote waarde is afkomstig van het feit dat strategie 2 veel subblokken nodig heeft om containers in te slapen, waardoor de waarden van  $\delta$  hoger liggen. Deze waarden van  $\delta$  worden gebruikt om het aantal sommaties te bepalen want uit formule (31) blijkt dat:

$$M^{S_2} = \sum_{j=k+1}^N \delta_j^{S_2}$$

De waarden voor  $\delta_6^{S_2}$ ,  $\delta_7^{S_2}$  en  $\delta_8^{S_2}$  zijn gelijk aan drie en de waarden voor  $\delta_9^{S_2}$  en  $\delta_{10}^{S_2}$  zijn gelijk aan vier. De som van de waarden van deze vijf variabelen is gelijk aan 17. De waarde 16 wordt bekomen omdat deze integraal gesommeerd wordt van  $i = 1$  t.e.m.  $i = M^{S_2} - 1 = 16$ .

**Strategy 2: 82,4068**

$E[Rv]$	19,6207	62,7861
$E[Rh]$	0	0
$E[RT]$	19,6207	62,7861

**Tabel 27: Het verwachte aantal herverplaatsingen voor strategie 2 in scenario 2**

Het verwachte aantal horizontale verplaatsingen voor strategie 3 in scenario 2 is hoger dan in scenario 1, met als waarde 32. De tweede en derde integraal worden gesommeerd over een waarde vijf omwille van de reden die zonet aangehaald is.

**Strategy 3: 74,7294**

$E[Rv]$	3,4881	19,6207	19,6207
$E[Rh]$	32		
$E[RT]$	35,4881	19,6207	19,6207

**Tabel 28: Het verwachte aantal herverplaatsingen voor strategie 3 in scenario 2**

### 5.2.8. Resultaten en bespreking model

Uit beide scenario's blijkt dat de eerste strategie de kleinste verwachte waarde heeft in verband met het aantal herverplaatsingen dat nodig is op lange termijn. Bij scenario 2 heeft de verwachte waarde van het aantal herverplaatsingen van strategie 2 de grootste waarde, terwijl bij scenario 1 strategie 3 verwacht wordt het meeste herverplaatsingen nodig te hebben. Het verschil tussen de volgorde van deze twee scenario's en de grootte van de waarden in beide scenario's, is het gevolg van de grootte van de functiewaarde  $S(t)$ , de overlevingsfunctie. In scenario 1 is de kans dat een container op tijdstip  $t$  nog steeds aanwezig is op het opslagterrein gelijk aan iets meer dan 50%, terwijl de waarde voor  $S(t)$  in scenario 2 slechts gelijk is aan net geen 20%.

Wanneer gekeken wordt naar de waarde van de variabele  $\delta$ , het aantal subblokken dat nodig is om de containers van een schip te stockeren, scoort strategie 3 het best. In deze strategie is telkens maar 1 subblok nodig om de nieuwe containers te stapelen, wel is een tweede subblok nodig om de 'oude' containers naar toe te transporteren. Merk ook op dat deze strategie als enige horizontale verplaatsingen heeft. Strategie 2 scoort het slechtst op deze variabele  $\delta$  en vereist 3 of meer subblokken om hetzelfde aantal containers op te slaan. Dit in tegenstelling tot strategie 2 waar slechts 2 subblokken nodig zijn voor de opslag van de inkomende containers.

Om een finale keuze te maken welke strategie het best past bij de terminal, moet een afweging gemaakt worden tussen deze twee variabelen. Het is duidelijk dat strategie 2 de slechtste keuze blijkt te zijn, omdat deze slecht scoort op beide variabelen. Strategie 1 scoort het best op het verwachte aantal herverplaatsingen. Strategie 2 daarentegen scoort het best op het aantal vereiste subblokken om containers op te slaan.

De voorkeur gaat uit naar strategie 1, omwille van twee redenen. Ten eerste omdat het verschil bij het aantal vereiste subblokken klein is. Ten tweede omdat het verwachte aantal herverplaatsingen op lange termijn sterk verschilt tussen deze twee strategieën, zeker in scenario 1. Merk op dat in dit model verschillende beperkingen en veronderstellingen worden gebruikt die niet altijd van toepassing zijn in de realiteit. Om een finale keuze te maken moet bijkomend onderzoek uitsluitel brengen over het feit welke strategie het meest efficiënt is.





## Hoofdstuk 6: Conclusie

Deze masterproef had als doel om manieren te onderzoeken om de productiviteit van een container terminal te verbeteren door een efficiëntere opslag van containers. In dit onderzoek is eerst gezocht naar de bestaande modellen in verband met de opslag van containers om vervolgens twee modellen na te bouwen.

In de literatuur zijn vier verschillende categorieën van modellen terug te vinden die trachten de opslag van containers te optimaliseren. Een eerste categorie van modellen heeft als doel om de tijd dat een schip of een container doorbrengt in de haven te minimaliseren. Een ander soort model focust zich meer op enkel de opslag van containers en hierbij probeert men het aan *re-handles* te minimaliseren. Een derde categorie vergelijkt verschillende stapelstrategieën met elkaar. De vierde en laatste categorie die in de literatuur terug te vinden is, bestaat uit modellen die ook de financiële kostprijs van bepaalde handelingen in rekening nemen.

Aan de hand van twee modellen worden de eerste drie categorieën meer diepgaand bekeken. Het eerste model bestaat uit een LP probleem waarbij de verwerking van de containers in een zo kort mogelijke tijd moet gebeuren. Door onvoorziene omstandigheden was het niet mogelijk om resultaten te genereren via dit model, waardoor de resultaten vervangen zijn door een kritische bespreking van het model. In het tweede model worden drie stapelstrategieën onderling vergeleken op basis van het aantal (onnodige) herverplaatsingen en het aantal vereiste subblokken voor de opslag van de containers. Na de bespreking van de resultaten van dit model wordt een voorkeur gegeven aan de eerste strategie omwille van de betere score op beide variabelen die gebruikt werden voor de onderlinge vergelijking.



## Referenties

*Barge Terminal: Activiteiten.* (z.d.). Opgevraagd op 26 mei, 2011, via <http://www.havengenk.be/bargeterminal>.

Bielli, M., Boulmakoul, A., & Rida, M. (2006). Object oriented model for container terminal distributed simulation. *European Journal of Operational Research* 175, 1731-1751.

Buck Consultants International (2007). Logistieke poort Limburg fase III – Het logistieke potentieel van Limburg. Opgevraagd op 23 oktober, 2011, via <http://www.google.be>.

Chen, C.Y., & Chao, S.L. (2004). A time-space network model for allocating yard storage space for export containers. *Transportation Planning Journal* Vol. 33 No. 2, pp. 227-248.

Dam Le-Griffin, H., & Murphy, M. (2006). Container terminal productivity: experiences at the ports of Los Angeles and Long Beach. NUF Conference Feb. 2006.

Dekker, R., Voogd, P. & van Asperen, E. (2007). Advanced methods for container stacking. *Container terminals and cargo systems, Part 2*, 131-154.

Department of Mathematics and Statistics at Queen's University (z.d.). The exponential distribution. opgevraagd op 26 mei, 2012, via <http://scholar.google.nl>.

Duinkerken, M.B., Evers, J.J.M., & Ottjes, J.A. (2001). A simulation model for integrating quay transport and stacking policies on automated container terminals. *Proceedings of the 15<sup>th</sup> European Simulation Multiconference*. Prague [SCS] pp 909-916.

*Evolutie containertrafiek in tonnen.* (z.d.). Opgevraagd op 26 mei, 2011, via [http://www.havenvanantwerpen.be/portal/pls/portal/!PORTAL.wwpob\\_page.show?\\_docname=1360031.PDF](http://www.havenvanantwerpen.be/portal/pls/portal/!PORTAL.wwpob_page.show?_docname=1360031.PDF).

*Focus op de haven: Een wereldhaven.* (z.d.). Opgevraagd op 26 mei, 2011, via [http://www.havenvanantwerpen.be/portal/page/portal/POA\\_NL/Focus%20op%20de%20haven/Een%20wereldhaven](http://www.havenvanantwerpen.be/portal/page/portal/POA_NL/Focus%20op%20de%20haven/Een%20wereldhaven).

*General Cargo Berths.* (z.d.). Opgevraagd op 26 mei, 2011, via <http://www.portofoostende.be/agh/default.htm>.

Günther, H.O., & Kim, K.H. (2006). Container terminals and terminal operations. *Operations Research Spectrum* 28, 437-445.

Han, Y., Lee, L.H., Chew, E.P., & Tan, K.C. (2008). A yard storage strategy for minimizing traffic congestion in a marine container transshipment hub. *OR Spectrum* 30, 697-720.

Henesey, L.E. (2006). Multi-agent systems for container terminal management. Blekinge Institute of Technology Doctoral Dissertation Series No 08.

Imai, A., Nishimura, E., & Papadimitriou, S. (2001). The dynamic berth allocation for a container port. *Transportation Research Part B* 35, 401-417.

Kim, K.H., & Kim, H.B. (1999). Segregating space allocation models for container inventories in port container terminals. *International Journal of Production Economics* 59, 415-423.

Kim, K.H., Park, Y.M., & Ryu, K. (2000). Deriving decision rules to locate export containers in container yards. *European Journal of Operation Research* 124, 89-101.

Kozan, E. (2000). Optimising container transfers at multimodal terminals. *Mathematical and Computer Modelling* 31, 235-243.

Kozan, E., & Preston, P. (1999). Genetic algorithms to schedule container transfers at multimodal terminals. *International Transactions in Operational Research* 6, 311-329.

Kozan, E., & Preston, P. (2006). Mathematical modelling of container transfers and storage locations at seaport terminals. *OR Spectrum: Quantitative Approaches in Management*, 28(4), pp. 519-537.

Lee, D.H., Wang, H.Q., & Miao, L. (2008). Quay crane scheduling with non-interference constraints in port container terminals. *Transportation Research Part E* 44, 124-135.

Linn, R., & Zhang, W. (1999). Hybrid flow shop scheduling: a survey. *Computers & Industrial Engineering* 37, 57-61.

Liu, C., Jula, H., & Ioannou, P. (2002). Design, simulation, and evaluation of automated container terminals. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 3(1): 12-26.

Ng, W.C., & Mak, K.L. (2005). Yard crane scheduling in port container terminals. *Applied Mathematical Modelling* 29, 263-276.

Nishimura, E., Imai, A., Janssens, G., & Papadimitriou, S. (2009). Container storage and transshipment marine terminals. *Transportation Research Part E* 45, 771-786.

Notteboom, T., & Rodrigue, J.P. (2005). Port regionalization: Towards a new phase in port development. *Maritime Policy & Management* 32 (3), 297-313.

Park, T., Choe, R., Kim, Y.H., & Ryu, K.R. (2010). Dynamic adjustment of container stacking policy in an automated container terminal. *International Journal of Production Economics*.

Preston, P., & Kozan, E. (2001). An approach to determine storage locations of containers at seaport terminals. *Computers & Operations Research* 28, 983-995.

Ruiz, R., & Vazquez-Rodriguez, J.A. (2009). The hybrid flow shop scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, Volume 205, Issue 1, 1-18.

Sauri, S., & Martin, E. (2011). Space allocating strategies for improving import yard performance at marine terminals. *Transportation Research Part E* 47, 1038-1057.

Stahlbock, R., & Voß, S. (2008). Operations research at container terminals: a literature update. *OR Spectrum* 30, 1-52.

Steenken D., Voß, S., & Stahlbock, R. (2004). Container terminal operation and operations research - a classification and literature review. *OR Spectrum*, vol. 26 no. 1, pp. 3-49.

Van Asperen, E., Borgman, B., & Dekker, R. (2010). Evaluating container stacking rules using simulation. *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference*.

Vis, I.F.A., & de Koster, R. (2003). Transshipment of containers at a container terminal: an overview. *European Journal of Operational Research* 147, 1-16.

Zeng, Q., & Yang, Z. (2009). Integrating simulation and optimization to schedule loading operations in container terminals. *Computers & Operations Research* 36, 1935-1944.

Zhang, C., Liu, J., Wan, Y.W., Murty, K.G., & Linn, R.J. (2003). Storage space allocation in container terminals. *Transportation Research Part B* 37, 883-903.

Zhu, Y., & Lim, A. (2004). Crane scheduling with spatial constraints: Mathematical model and solving approaches. In: *AI&M 30-2004*, eighth international symposium on artificial intelligence and mathematics, Fort Lauderdale, January 4-6.





@FOR(CONTAINERS(I): @FOR(CONTAINERS(J)|J #NE# I : @FOR(STAGES(S): @FOR(MACHINES(M):  
Z(I,J,S,M) + Z(J,I,S,M) <= 1)))));

@FOR(CONTAINERS(I): @FOR(CONTAINERS(J)|J #NE# I : @FOR(STAGES(S): @FOR(MACHINES(M):  
X(I,S,M) - 0.5 <= 0.5\*(Z(I,J,S,M) + Z(J,I,S,M))))));

@FOR(CONTAINERS(I): @FOR(CONTAINERS(J)|J #NE# I : @FOR(STAGES(S): @FOR(MACHINES(M):  
0.5\*(Z(I,J,S,M) + Z(J,I,S,M)) <= X(I,S,M)))));

@FOR(CONTAINERS(I): @FOR(CONTAINERS(J)|J #NE# I : @FOR(STAGES(S)|S #LE# 2:  
@FOR(MACHINES(M): T(I,(S+1)) + SETUP(I,J,S) <= T(J,S) + 100000\*(1 - Z(I,J,S,M))))));

T(1,1) <= T(2,1);  
T(1,1) <= T(3,1);  
T(1,1) <= T(4,1);  
T(1,2) <= T(2,2);  
T(1,2) <= T(3,2);  
T(1,2) <= T(4,2);  
T(1,3) <= T(2,3);  
T(1,3) <= T(3,3);  
T(1,3) <= T(4,3);

T(2,1) <= T(3,1);  
T(2,1) <= T(4,1);  
T(2,2) <= T(3,2);  
T(2,2) <= T(4,2);  
T(2,3) <= T(3,3);  
T(2,3) <= T(4,3);

T(3,1) <= T(4,1);  
T(3,2) <= T(4,2);  
T(3,3) <= T(4,3);

@FOR(CONTAINERS(I): @FOR(STAGES(S): @FOR(MACHINES(M): @BIN(X(I,S,M)))));

@FOR(CONTAINERS(I): @FOR(CONTAINERS(J)|J #NE# I : @FOR(STAGES(S): @FOR(MACHINES(M):  
@BIN(Z(I,J,S,M))))));

@FOR(CONTAINERS(I): @FOR(CONTAINERS(J)|J #NE# I : @FOR(STAGES(S): @FOR(MACHINES(M):  
@BIN(Y(I,J,S,M))))));



## Bijlage 2

### Scenario 1:

Werkblad: 'Data'

Input:		Output: functions:		Total number of rehandles:	
Data	Value	Data	Value	Data	Value
lambda =	0,23	F(t) =	0,4984	E[RT] for S1	52,8876
t =	3	f(t) =	0,1154	E[RT] for S2	123,4044
h =	3	S(t) =	0,5016	E[RT] for S3	176,6628
n =	180	h(t) =	0,2300	E[Rh] for S3	18,0000
tj =	2	<b>homogeneous stack:</b>		<b>Integral homogeneous stack:</b>	
ti =	0	Data	Value	Data	Value
ΔT =	2	E[R(t)] =	0,1736	Integral (E[R(t)]dt)=	0,3774
j =	6	<b>heterogeneous stack:</b>		<b>Integral heterogeneous stack:</b>	
K =	5	Data	Value	Data	Value
N =	7	E[H(t)] =	1,5047	Integral (Eij[R(t)]dt) =	0,5839

Delta for each strategy and for each j:				C for each strategy and for each j					
j	S1	S2	S3	j	S1	S2	S3		
1	0	0	0	1	(1,1)			(1,1)	
2	0	0	0	2	(2,2)			(2,2)	
3	0	0	0	3	(3,3)			(3,3)	
4	0	0	0	4	(4,4)			(4,4)	
5	0	0	0	5	(5,5)			(5,5)	
6	2	3	1	6	(1,6)	(2,6)		(3,6)	(4,6)
7	2	3	1	7	(2,7)	(3,7)	(3,7)	(4,7)	(5,7)
8	2	3	1	8	(3,8)	(4,8)	(3,8)	(4,8)	(5,8)
9	2	3	1	9	(4,9)	(5,9)	(3,9)	(4,9)	(5,9)
10	2	3	1	10	(1,10)	(5,10)	(3,10)	(4,10)	(5,10)

Werkblad: 'Homogeneous stack'

Data	Value
lambda =	0,23
t =	3
h =	3

Data	Value
F(t) =	0,4984
f(t) =	0,1154
S(t) =	0,5016
h(t) =	0,2300

R	PR(t)	R*PR(t)
2	0,0290	0,0580
1	0,1155	0,1155

E[R(t)] =	0,1736
-----------	--------

h	n	h-n	faculteit	R=h-1	R=h-2	R=h-3	R=h-4	R=h-5	R=h-6	R=h-7	R=h-8	R=h-9
3	10	-7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	9	-6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	8	-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	7	-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	6	-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	5	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	4	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3	0	1	0,0290	0	0	0	0	0	0	0	0
3	2	1	3	0	0,1155	0	0	0	0	0	0	0
				0,0290	0,1155	0	0	0	0	0	0	0





Werkblad: 'Value Eij(R(t))'

Data	Value
lambda =	0,23
tj - ti =	2
h =	3

Data	Value
F(t) =	0,3687
f(t) =	0,1452
S(t) =	0,6313
h(t) =	0,2300

z	Pz(tj-ti)	R	PR(t)	Ez,h-z[R(t)]
3	0,2516	3	0,1262	0,3786
2	0,4408	2	0,3762	0,7524
1	0,2575	1	0,3738	0,3738
0	0,0501	0	0,1238	0

Eij[R(t)] =	0,5231
-------------	--------

h	n	h-n	faculteit	R=h	R=h-1	R=h-2	R=h-3	R=h-4	R=h-5	R=h-6	R=h-7	R=h-8	R=h-9	R=h-10
3	10	-7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	9	-6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	8	-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	7	-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	6	-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	5	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	4	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3	0	1	0,2516	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	2	1	3	0	0,4408	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1	2	3	0	0	0,2575	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	3	1	0	0	0	0,0501	0	0	0	0	0	0	0
				0,2516	0,4408	0,2575	0,0501	0	0	0	0	0	0	0

Werkblad: 'Integral Heterogeneous stack'

The screenshot shows a Microsoft Excel spreadsheet with the following data and formulas:

		Data			
	<b>lambda =</b>		0,23	<b>z=0</b>	0,0164
	<b>tj - ti =</b>		3	<b>z=1</b>	0,0742
	<b>h =</b>		3	<b>z=2</b>	0,3822
				<b>z=3</b>	0,1112

		Waarde	
	<b>F(t) =</b>		0,4984
	<b>f(t) =</b>		0,1154
	<b>S(t) =</b>		0,5016
	<b>h(t) =</b>		0,2300

	<b>z</b>	<b>Pz(tj-ti)</b>	<b>R</b>	<b>PR(t)</b>	<b>Ez,h-z[R(t)]</b>
	<b>3</b>	0,2516	3	0,1262	0,3786
	<b>2</b>	0,4408	2	0,3762	0,7524
	<b>1</b>	0,2575	1	0,3738	0,3738
	<b>0</b>	0,0501	0	0,1238	0

	<b>Eij[R(t)] =</b>	0,0164
		0,0742
		0,3822
		0,1112
	<b>integral(Eij[R(t)]dt)</b>	0,5839

Werkblad: 'Stack delta and C S1'

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data:

	A	B	C	D
1				
2		aantal blokken =	5	
3		n =	180	
4		aantal containers na t	114	
5		bij beginaantal van 180	72	
6		en $\Delta t=2$	45	
7			28	
8			18	
9			11	
10			7	
11			4	
12			3	
13				
14		<b>Calculations</b>		
15				
16			<b>Data</b>	
17		lambda =	0,23	
18		t =	2	
19		h =	3	
20		n =	180	
21		si =	60	
22			<b>Waarde</b>	
23		F(t) =	0,368716	
24		f(t) =	0,145195	
25		S(t) =	0,631284	
26		h(t) =	0,23	
27				
28		<b>z</b>	<b>z*Pz(t)</b>	
29		3	0,754736	
30		2	0,881643	
31		1	0,257472	
39		0	0	
40				
41		E[H(tj)] =	1,893851	
42				
43		containers =	114	

Model Sauri et al 30-05 scenario 1.xlsx - Microsoft Excel

	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1																	
2		t	j	5		4		3		2		1					
3		1	0	180	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
4		2	114	0	0	180	0	0	0	0	0	0	0				
5		3	72	0	114	0	180	0	0	0	0	0	0				
6		4	45	0	72	0	0	114	0	0	180	0	0				
7		5	28	0	45	0	0	72	0	114	0	0	180				
8		6	18	162	28	18	45	0	72	0	0	114	0				
9		7	114	0	29	151	32	29	45	0	72	0	0				
10		8	72	0	114	0	39	141	28	39	45	0	0				
11		9	45	0	72	0	114	0	42	138	28	42	0				
12		10	28	44	45	0	72	0	114	0	44	136	0				
13																	
14																	
15																	
16																	
17		h	n	h-n	faculteit	z=h	z=h-1	z=h-2	z=h-3	z=h-4	z=h-5	z=h-6	z=h-7	z=h-8	z=1	z=0	
18		3	10	-7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
19		3	9	-6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20		3	8	-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
21		3	7	-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
22		3	6	-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
23		3	5	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
24		3	4	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25		3	3	0	1	0,2516	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
26		3	2	1	3	0	0,4408	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
27		3	1	2	3	0	0	0,2575	0	0	0	0	0	0	0	0	
28		3	0	3	1	0	0	0	0,0501	0	0	0	0	0	0	0	
29						0,2516	0,4408	0,2575	0,0501	0	0	0	0	0	0	0	

Stack delta and C S1    Stack delta and C S2    Stack delta and C S3    Number of rehandles per strateg

Model Sauri et al 30-05 scenario 1.xlsx - Microsoft Excel

	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
29																
30		delta =														
31		1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	delta S1 1	1	0
32		2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	delta S1 2	1	0
33		3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	delta S1 3	1	0
34		4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	delta S1 4	1	0
35		5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	delta S1 5	1	0
36		6	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	delta S1 6	2	2
37		7	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	delta S1 7	2	2
38		8	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	delta S1 8	2	2
39		9	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	delta S1 9	2	2
40		10	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	delta S1 10	2	2
41																
42		C =	(1,1)	(2,2)	(3,3)	(4,4)	(5,5)									
43																
44																
45																
46			(1,6)	(2,6)	(3,7)	(4,8)	(5,9)									
47				(2,7)	(3,8)	(4,9)	(5,10)									
48																
49																
50																
51																
52																
53																

Stack delta and C S1    Stack delta and C S2    Stack delta and C S3    Number of rehandles per strateg



Werkblad: 'Stack delta and C S2'

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data and calculations:

	A	B	C	D
1				
2		aantal blokken =	5	
3		n =	180	
4		aantal containers na t	114	
5		bij beginaantal van 180	72	
6		en $\Delta t=2$	45	
7			28	
8			18	
9			11	
10			7	
11			4	
12			3	
13				
14		<b>Calculations</b>		
15				
16			Data	
17		lambda =	0,23	
18		t =	2	
19		h =	3	
20		n =	180	
21		si =	60	
22			Waarde	
23		F(t) =	0,368716	
24		f(t) =	0,145195	
25		S(t) =	0,631284	
26		h(t) =	0,23	
27				
28		z	z*Pz(t)	
29		3	0,754736	
30		2	0,881643	
31		1	0,257472	
39		0	0	
40				
41		E[H(tj)] =	1,893851	
42				
43		containers =	114	



Werkblad: 'Stack delta and C S3'

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data:

	A	B	C	D
1				
2		aantal blokken =	5	
3		n =	180	
4		aantal containers na t	114	
5		bij beginaantal van 180	72	
6		en $\Delta t=2$	45	
7			28	
8			18	
9			11	
10			7	
11			4	
12			3	
13				
14		<b>Calculations</b>		
15				
16			<b>Data</b>	
17		lambda =	0,23	
18		t =	2	
19		h =	3	
20		n =	180	
21		si =	60	
22			<b>Waarde</b>	
23		F(t) =	0,368716	
24		f(t) =	0,145195	
25		S(t) =	0,631284	
26		h(t) =	0,23	
27				
28		<b>z</b>	<b>z*Pz(t)</b>	
29		3	0,754736	
30		2	0,881643	
31		1	0,257472	
39		0	0	
40				
41		<b>E[H(tj)] =</b>	1,893851	
42				
43		<b>containers =</b>	114	



Werkblad: 'Number of rehandles per strategy'

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data:

	A	B	C	D	E	F
1						
2		<b>Strategy 1: 105,103</b>				
3						
4		E[Rv]	70,06895	35,03448		
5		E[Rh]	0	0		
6		E[RT]	70,06895	35,03448		
7						
8		<b>Strategy 2: 245,241</b>				
9						
10		E[Rv]	70,06895	175,1724		
11		E[Rh]	0	0		
12		E[RT]	70,06895	175,1724		
13						
14		<b>Strategy 3: 270,248</b>				
15						
16		E[Rv]	7,006895	175,1724	70,06895	
17		E[Rh]	18			
18		E[RT]	25,0069	175,1724	70,06895	
19						

Werkblad: 'Calculation sheet'

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1		Data		h	n	h-n	faculteit	R=h	R=h-1	R=h-2	R=h-3	R=h-4	R=h-5	R=h-6	R=h-7
2	lambda =	0,23		3	10	-7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	tj - ti =	2		3	9	-6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	h =	3		3	8	-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	n =	180		3	7	-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	si =	60		3	6	-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7		Waarde		3	5	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	F(t) =	0,368716354		3	4	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	f(t) =	0,145195238		3	3	0	1	0,251578553	0	0	0	0	0	0	0
10	S(t) =	0,631283646		3	2	1	3	0	0,440821464	0	0	0	0	0	0
11	h(t) =	0,23		3	1	2	3	0	0	0,257472	0	0	0	0	0
12				3	0	3	1	0	0	0	0,050128	0	0	0	0
13								0,251578553	0,440821464	0,257472	0,050128	0	0	0	0
14	z	Pz(tj-ti)	R	PR(t)	Ez,h-z[R(t)]										
15	3	0,251578553	3	0,042061927	0,126185782										
16	2	0,440821464	2	0,188089157	0,376178314										
17	1	0,257472349	1	0,373814234	0,373814234										
18	0	0,050127634	0	0,12382167	0										
19	0	0	0	0	0										
20	0	0	0	0	0										
21	0	0	0	0	0										
22	0	0	0	0	0										
23	0	0	0	0	0										
24	0	0	0	0	0										
25	0	0	0	0	0										
26															
27	Eij[R(t)] =	0,031745636													
28		0,165827475													
29		0,096246829													
30															
31															
32															
33															
34	Eij[R(t)] =	0,293819941													
35															
36															
37															
38															
39															
40															

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
41		Data		h	n	h-n	faculteit	z=h	z=h-1	z=h-2	z=h-3	z=h-4	z=h-5	z=h-6	z=h-7
42	lambda =	0,23		3	10	-7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
43	t =	2		3	9	-6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
44	h =	3		3	8	-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45				3	7	-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
46		Waarde		3	6	-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
47				3	5	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48	F(t) =	0,368716354		3	4	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
49	f(t) =	0,145195238		3	3	0	1	0,251578553	0	0	0	0	0	0	0
50	S(t) =	0,631283646		3	2	1	3	0	0,440821464	0	0	0	0	0	0
51	h(t) =	0,23		3	1	2	3	0	0	0,257472	0	0	0	0	0
52				3	0	3	1	0	0	0	0,050128	0	0	0	0
53	z	Pz(t)						0,251578553	0,440821464	0,257472	0,050128	0	0	0	0
54	3	0,754735659													
55	2	0,881642928													
56	1	0,257472349													
57	0	0													
58	0	0													
59	0	0													
60	0	0													
61	0	0													
62	0	0													
63	0	0													
64	0	0													
65															
66	E[H(t)] =	1,893850937													
67															

Scenario 2:

Analoog aan scenario 1, enkel andere waarden.

## **Auteursrechtelijke overeenkomst**

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:

**Verbetering van de productiviteit van een container terminal door efficiënte opslag van containers**

Richting: **master in de toegepaste economische wetenschappen: handelsingenieur-operationeel management en logistiek**

Jaar: **2012**

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Voor akkoord,

**Verjans, Philippe**

Datum: **1/06/2012**