

2011
2012

BEDRIJFSECONOMISCHE WETENSCHAPPEN

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

Masterproef

Modellering van wachttijden in de binnenvaart

Promotor :
Prof. dr. An CARIS

Copromotor :
dr. Katrien RAMAEKERS

Hanne Pollaris

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

Modellering van wachttijden in de binnenvaart

Promotor :
Prof. dr. An CARIS

Copromotor :
dr. Katrien RAMAEKERS

Hanne Pollaris

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

WOORD VOORAF

Deze masterproef vormt het sluitstuk van mijn opleiding Handelsingenieur, met afstudeerrichting Operationeel Management en Logistiek aan de Universiteit Hasselt. Het onderwerp van deze thesis 'Modellering van wachttijden in de binnenvaart' sprak mij onmiddellijk aan door de belangrijke rol die de binnenvaart speelt binnen de logistiek in Limburg en in Vlaanderen. Het schrijven van deze eindverhandeling was niet mogelijk geweest zonder de hulp van een aantal mensen. Ik wil hen daarom langs deze weg graag bedanken.

Vooreerst gaat mijn dank uit naar mijn promotor dr. An Caris voor haar deskundig advies, begeleiding en kritische en opbouwende feedback doorheen het hele jaar. Ook wil ik graag mijn co-promotor dr. Katrien Ramaekers bedanken.

Verder wil ik graag een woord van dank richten tot Aline Croonen voor de onvergetelijke studentenjaren die we samen hebben doorgebracht. In het bijzonder wil ik haar oprecht bedanken voor de enorme steun en toeverlaat die ze voor mij was in het veelbewogen afgelopen half jaar.

Tot slot wil ik heel graag mijn ouders, vriend, zussen en schoonbroers bedanken. Hun onvoorwaardelijk geloof in mij was een enorme steun doorheen mijn hele studentenperiode. Specifiek wil ik mijn ouders bedanken omdat ze mij altijd alle kansen hebben gegeven, waaronder het starten met de studies Handelsingenieur.

Hanne Pollaris

Hasselt, mei 2012

SAMENVATTING

Uit het praktijkprobleem blijkt dat er nood is naar onderzoek over het modelleren en reduceren van wachttijden voor de binnenvaart aan sluisen. Dit is belangrijk om de binnenvaart nog aantrekkelijker te maken voor bedrijven en om via de binnenvaart de geanticipeerde groei in goederenstromen in Vlaanderen op te vangen. Dit was dan ook de centrale onderzoeksvraag van deze masterproef. Daarnaast werden vijf deelvragen geformuleerd om de centrale onderzoeksvraag te helpen beantwoorden. In de literatuurstudie in hoofdstuk 2 komen de factoren aan bod die wachttijden beïnvloeden aan sluisen, de oplossingen om de wachttijden te reduceren en de modellen waarmee wachttijden aan sluisen geschat worden. Hiermee wordt een antwoord gegeven op de eerste drie deelvragen. In het praktijkonderzoek in hoofdstuk 3 wordt een antwoord gegeven op de vierde en vijfde deelvraag. In een eerste deel van het praktijkonderzoek wordt de verdeling van de aankomsttijden aan een sluis in het Albertkanaal onderzocht. In een tweede deel wordt een simulatiemodel ontwikkeld van de sluis waarin oplossingen onderzocht worden om de wachttijden te reduceren.

In de literatuurstudie werden factoren geïdentificeerd die wachttijden aan sluisen beïnvloeden. Wachtrijen ontstaan wanneer gedurende een korte periode de vraag groter is dan het aanbod. Een onderscheid wordt gemaakt tussen de factoren die de vraag en het aanbod aan sluisen beïnvloeden. De vraag aan een sluis komt overeen met het aantal schepen die doorheen de sluis willen varen op een bepaald ogenblik. De belangrijkste determinanten van deze vraag die in de wetenschappelijke literatuur worden teruggevonden zijn economische groei, transportkosten, reistijd, alternatieve vervoersmodi, weersomstandigheden, toestand van de rivier, onbekende risico's (zoals ongevallen), seizoensgebonden factoren en congestie. Daarnaast blijkt uit enkele artikels dat de afhankelijkheid van een sluis aan andere sluisen eveneens een invloed uitoefent op de wachttijden aan deze sluis. Hoe afhankelijker een sluis is van een aangrenzende sluis, hoe minder de schepen de mogelijkheid hebben om zich te verspreiden tussen twee opeenvolgende sluisen. Afhankelijkheid tussen sluisen heeft dus een invloed op het aankomstritme, wat op zijn beurt een invloed heeft op de wachttijden. Het aanbod van de sluisen wordt voornamelijk bepaald door de sluisbedieningstijd. Dit wordt onder meer beïnvloed door de vaarrichting van het schip, het aantal keer dat het schip

gesplitst moet worden om in de sluiskamer te passen, de ratio tussen schiplengte en sluiskamerlengte en de ratio tussen schipbreedte en sluiskamerbreedte. Ten slotte heeft ook de variabiliteit van de bedieningstijd een invloed op de wachttijd. Indien de variabiliteit van de bedieningstijd toeneemt, zal de totale wachttijd eveneens toenemen.

Oplossingen uit de wetenschappelijke literatuur om wachttijden aan sluisen te verminderen worden eveneens besproken. Een eerste oplossing die wordt aangereikt is het gebruik van efficiënte prioriteitsregels. Prioriteitsregels die voorrang geven aan schepen met de kortste sluisbedieningstijd (SPF) zorgen voor kortere wachttijden dan de klassieke First-In-First-Out (FIFO) regel. Alternatieve prioriteitsregels zijn echter niet altijd even eerlijk aangezien sommige schippers hierdoor langer dienen te wachten aan sluisen dan andere schippers, die na hen arriveerden. Het idee van een 'fairness beperking' wordt daarom aangehaald. Deze 'fairness beperking' plaatst een maximum op het aantal schepen dat een bepaald schip mogen voorbijgaan in de rij. Gezien deze eerlijkheid wel ten koste gaat van de efficiëntie van het systeem, zal in de praktijk een afweging gemaakt dienen te worden tussen de eerlijkheid en de efficiëntie van het wachtrijsysteem. Een tweede manier om de wachttijden te reduceren is het inzetten van helperbootjes of stewards in de sluis. Helperbootjes worden ingezet bij drukke sluisen om schepen te helpen om de sluis snel en veilig te passeren. Een derde manier die wordt aangehaald om de wachttijden te reduceren is een planningssysteem waarbij schippers op voorhand een afspraak dienen te maken om de sluis te passeren. De schippers weten dan exact op welk tijdstip ze bij de sluis moeten aankomen en kunnen hun snelheid hieraan aanpassen. Niet alleen de wachttijden, maar eveneens het brandstofverbruik zou hierdoor dus gereduceerd kunnen worden. Een vierde manier om de wachttijden te verminderen en vooral de daarbij horende kosten te reduceren is het hanteren van 'online simulatiemodellen' door de 'dispatchers' van bedrijven die grote ladingen via de binnenvaart vervoeren. Tot slot zorgen infrastructurele sluisverbeteringen voor een capaciteitsuitbreiding van de sluis en dus voor een reductie van de wachttijden.

Wachttijden aan sluisen worden op vier verschillende manieren gemodelleerd in de wetenschappelijke literatuur. Eerst werden wachttijden gemodelleerd via wachtrijtheorie, maar door de onrealistische beperkingen van deze modellen, geeft deze methode meestal geen betrouwbare resultaten. Daarnaast worden simulatiemodellen gebruikt. Deze simuleren

de volledige sluiswerking waardoor ze een juistere weergave kunnen geven van de werkelijkheid en hun resultaten exacter zullen zijn dan de resultaten op basis van de wachtrijmodellen. Een derde manier om wachttijden aan sluisen te modelleren is met behulp van een metamodel. Dit is een model dat geschat is op basis van gesimuleerde data. Metamodellen nemen veel minder tijd in beslag dan simulatiemodellen, hetgeen vaak cruciaal is als op operationeel vlak beslissingen genomen dienen te worden. De keuze tussen een simulatiemodel en een metamodel is daarom een afweging tussen enerzijds efficiëntie van modellering en anderzijds precisie van de sluiswerking. Tot slot worden ook artificiële neurale netwerk-modellen gebruikt om wachttijden aan sluisen te modelleren. Dit spaart eveneens heel wat rekentijd uit in vergelijking met simulatiemodellen. Neurale netwerken zijn daarenboven geschikter voor complexe netwerken dan metamodelen.

In het praktijkonderzoek wordt een simulatiemodel in het computerprogramma Arena ontwikkeld van de binnenvaarttrafiek aan de sluis in Diepenbeek op het Albertkanaal. Er wordt gebruik gemaakt van een dataset van NV De Scheepvaart over de aankomsten van schepen aan de sluis in maart 2007. Eerst wordt gezocht naar een kansverdeling om de aankomsttijden aan de sluis te benaderen. In het aankomstenpatroon kunnen groepjes van schepen geïdentificeerd worden die samen aankomen bij de sluis. Een mogelijke verklaring hiervoor is de afhankelijkheid van de sluis in Diepenbeek aan de nabijgelegen sluisen in Hasselt en Genk. Hierdoor komen de schepen die samen versast werden in de sluis van Hasselt of Genk in groepjes aan bij de sluis van Diepenbeek. Uit de analyse in 'input analyser', een tool van Arena, blijkt dat de tussenaankomsttijden aan de sluis van zowel de schepen als de groepjes van schepen niet benaderd kunnen worden door een kansverdeling. In het simulatiemodel worden daarom de geobserveerde aankomsttijden gebruikt.

Twee oplossingen die werden aangereikt vanuit de wetenschappelijke literatuur worden getoetst in het simulatiemodel. Eerst wordt de impact op de wachttijd van het veranderen van de prioriteitsregel van FIFO naar 'Kleinste Oppervlakte Eerst' gemeten. Dit blijkt nauwelijks een invloed uit te oefenen op de gemiddelde wachttijd. Daarnaast worden de waarden van de parameters van de verdeling van de bedieningstijd gereduceerd. Het minimum, de modus en het maximum van de triangulaire verdeling worden verminderd met twee minuten. Ook dit scenario blijkt echter geen significante reductie te weeg te brengen in de gemiddelde

wachttijd. De gemiddelde systeemtijd ligt wel significant lager in dit scenario. Pas wanneer het minimum, de modus en het maximum van de triangulaire verdeling van de bedieningstijden verminderd worden met vier minuten, ligt eveneens de gemiddelde wachttijd significant lager dan in het basisscenario.

Tot slot worden de mogelijkheden voor verder onderzoek omtrent de wachttijden aan de sluizen aan het Albertkanaal besproken. Een mogelijkheid is om het simulatiemodel uit te breiden met nog een tweede sluiskamer. Daarnaast kunnen meerdere sluizen worden toegevoegd aan het model om de impact te kunnen meten van een maatregel op de aangrenzende sluizen.

INHOUDSOPGAVE

Woord vooraf	I
Samenvatting	III
Inhoudsopgave	VII
Lijst van tabellen	XI
Lijst van figuren	XIII
Hoofdstuk 1: Probleemstelling	1
1.1 Praktijkprobleem	1
1.2 Onderzoeksvragen	3
Hoofdstuk 2: Literatuurstudie	5
2.1 Inleidende begrippen	5
2.1.1 Sluiswerking	5
2.1.2 Capaciteit van een sluis	7
2.1.3 Prioriteitsregels aan sluisen	8
2.1.4 Eigenschappen van binnenvaartschepen	8
2.2 Factoren die een invloed uitoefenen op de wachttijden aan sluisen	9
2.3 Oplossingen	15
2.4 Modellering van wachttijden aan sluisen	17
2.4.1 Wachtrijtheorie	18
2.4.2 Simulatiemodel	19
2.4.2.1 Uitleg simulatiemodel	19
2.4.2.2 Simulatiemodellen van het binnenvaartverkeer rond sluisen	20
2.4.3 Metamodel	28
2.4.4 Artificieel neurale netwerk-model	35
Hoofdstuk 3: Praktijkonderzoek	39
3.1 Inleiding praktijkonderzoek	39

3.2	Beschrijving van de data	39
3.2.1	Algemene gegevens	39
3.2.2	Aankomstenproces	40
3.2.3	Afmetingen van de schepen	49
3.3	Discrete event simulatiemodel	50
3.4	Ontwikkeling simulatiemodel	51
3.4.1	Assumpties	51
3.4.2	Attributen	52
3.4.3	Variabelen	53
3.4.5	Opbouw simulatiemodel	54
3.4.6	Prestatiemaatstaven	59
3.4.7	Replicatieparameters	59
3.5	Resultaten simulatiemodel	60
3.5.1	Algemene resultaten	60
3.5.2	Benuttingsgraad	60
3.5.3	Systeemtijd	62
3.5.4	Conclusies	64
3.6	Sensitiviteitsanalyse	64
3.6.1	Sensitiviteit parameter 'Aantal minuten wachten met versassen'	65
3.6.1.1	Beschrijving alternatieve scenario's	65
3.6.1.2	Gepaarde t-test van scenario A met basisscenario	67
3.6.1.3	Gepaarde t-test van scenario B met basisscenario	70
3.6.1.4	Conclusies	72
3.6.2	Sensitiviteit prioriteitsregel	72
3.6.2.1	Beschrijving alternatief scenario	73
3.6.2.2	Conclusies	74
3.6.3	Sensitiviteit sluisbedieningstijd	75
3.6.3.1	Beschrijving alternatief scenario	75
3.6.3.2	Gepaarde t-test van gemiddelde wachttijd basisscenario met alternatief scenario	77
3.6.3.3	Gepaarde t-test van gemiddelde systeemtijd basisscenario met alternatief scenario	80
3.6.3.4	Conclusies	82
3.7	Beperkingen simulatiemodel	83

3.8	Toekomstig onderzoek _____	84
4.	Conclusies _____	89
4.1	Conclusies uit het onderzoek _____	89
4.2	Beperkingen en suggesties voor toekomstig onderzoek _____	92
	Literatuurlijst _____	95
	Bijlagen _____	101

LIJST VAN TABELLEN

Tabel 1: Factoren die de vraag en het aanbod aan sluizen beïnvloeden.....	10
Tabel 2: Samenvatting gegevens aankomsten stroomopwaarts	41
Tabel 3: Samenvatting gegevens aankomsten stroomafwaarts	42
Tabel 4: Samenvatting gegevens, kansverdeling en Chi kwadraat test tussenaankomsttijden stroomopwaarts.....	43
Tabel 5: Samenvatting gegevens, kansverdeling en Chi kwadraat test aankomsttijden stroomopwaarts 1 maart 2007	45
Tabel 6: Samenvatting gegevens, kansverdeling en Chi kwadraat test aankomsttijden groepjes stroomopwaarts op 1 maart 2007	46
Tabel 7: Samenvatting gegevens, kansverdeling en Chi kwadraat test tussenaankomsttijden groepjes stroomopwaarts	47
Tabel 8: Samenvatting gegevens, kansverdeling en Chi kwadraat test spreiding binnen groepjes stroomopwaarts.....	48
Tabel 9: Samenvatting gegevens, kansverdeling en Chi kwadraat test afmetingen schepen	50
Tabel 10: Simulatieoutput benuttingsgraad per versassing	61
Tabel 11: Simulatieoutput wachttijd, transfertijd en systeemtijd	62
Tabel 12: Maximale wachttijden per replicatie	63
Tabel 13: Gemiddelde wachttijd i.f.v. het aantal minuten dat gewacht wordt op een arriverend schip	66
Tabel 14: Maximale wachttijd i.f.v. het aantal minuten dat gewacht wordt op een arriverend schip	66

Tabel 15: Benuttingspercentage sluiskamer i.f.v. het aantal minuten dat gewacht wordt op een arriverend schip	66
Tabel 16: Berekening gepaard t-interval basisscenario en scenario A van gemiddelde wachttijden van schepen stroomopwaarts.....	68
Tabel 17: Gemiddelde wachttijd i.f.v. de prioriteitsregel	73
Tabel 18: Maximale wachttijd i.f.v. de prioriteitsregel	73
Tabel 19: Benuttingspercentage sluiskamer per versassing i.f.v. de prioriteitsregel	74
Tabel 20: Gemiddelde wachttijd i.f.v. de bedieningstijd	76
Tabel 21: Maximale wachttijd i.f.v. de bedieningstijd	76
Tabel 22: Benuttingspercentage sluiskamer i.f.v. de bedieningstijd	76
Tabel 23: Gemiddelde systeemtijd i.f.v. de bedieningstijd	76

LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1: Planzicht van de Berendrechtsluis (bron: Van de Walle & De Mulder, 2008)	6
Figuur 2: Werking van een sluis (bron: Vlaamse overheid, departement mobiliteit en openbare werken, z.d.).....	7
Figuur 3: Afhankelijkheid sluizen	11
Figuur 4: Voorbeeld van reiswegen in een boomnetwerk (bron: Wang et al., 2005)	21
Figuur 5: Structuur en elementen van het simulatiemodel (bron: Dai, 1993, eigen bewerking).....	24
Figuur 6: Schematische weergave events of gebeurtenissen in simulatiemodel (bron: Dai, 1993, eigen bewerking).....	27
Figuur 7: Structuur van een neurale netwerkmodel uit Kim & Schonfeld (1995).....	36
Figuur 8: Histogram aankomsten stroomopwaarts	41
Figuur 9: Histogram aankomsten stroomafwaarts	41
Figuur 10: Histogram tussenaankomsttijden stroomopwaarts	43
Figuur 11: Histogram aankomsten stroomopwaarts 1 maart 2007.....	45
Figuur 12: Histogram aankomsten groepjes stroomopwaarts 1 maart 2007.....	46
Figuur 13: Histogram tussenaankomsttijden groepjes stroomopwaarts	47
Figuur 14: Histogram spreiding binnen groepjes stroomopwaarts	48
Figuur 15: Histogram afmetingen van de schepen	50
Figuur 16: Wachtrijsysteem	51
Figuur 17: Generatie schepen in Arena.....	55
Figuur 18: Versassingsproces deel 1 Arena.....	55
Figuur 19: Versassingsproces deel 2 Arena.....	56
Figuur 20: Versassingsproces deel 3 Arena.....	58

Figuur 21: Verlaten van systeem in Arena	58
Figuur 22: Gemiddeld aantal entiteiten en versassingen per replicatie per vaarrichting	60
Figuur 23: Mogelijk beslissingsmodel plaatsing schepen die stroomopwaarts varen (OW) in de sluis kamers.....	85

HOOFDSTUK 1: PROBLEEMSTELLING

1.1 Praktijkprobleem

Vlaanderen is uitgegroeid tot dé logistieke topregio van Europa (Flanders logistics, z.d.). Het is belangrijk dat voldoende aandacht aan onze logistieke infrastructuur besteed wordt, zodat we deze positie kunnen blijven behouden en zelfs uitbreiden. Het goederenvervoer was in 2007 in Vlaanderen verantwoordelijk voor 20,5% van het wegverkeer (Mobiliteitsraad Vlaanderen, 2009). Daarenboven wordt voorspeld dat in de toekomst het goederenvervoer nog zal toenemen. Het Federaal Planbureau voorspelde een toename van 51% van de totale vervoerde tonnage over de weg, per spoor en via de binnenvaart in België tegen 2030 (in vergelijking met het tonnage in 2005) (Federaal Planbureau, 2009). Het ziet er naar uit dat het grootste deel van deze stijging opgevangen zal worden door het wegverkeer. Dit zal zorgen voor meer files, meer verliesuren en meer kosten voor de maatschappij. Een maatschappij waarin nochtans verkeersveiligheid en leefmilieu een steeds belangrijkere rol spelen (Vandewalle, 2009). Het is daarom noodzakelijk dat bedrijven overschakelen naar alternatieve vervoersmodi zoals naar de trein of binnenvaart. In deze masterthesis zal verder worden ingegaan op vervoer via de binnenvaart.

De binnenvaart is een uitstekend alternatief voor bedrijven die de files op de weg willen omzeilen en op een meer maatschappelijk verantwoorde manier willen omgaan met mobiliteit en veiligheid (De Scheepvaart NV, 2010). De binnenvaart staat ecologisch zeer sterk ten opzichte van het wegvervoer wat betreft de impact van emissies, geluid en veiligheid (Luysterman, 2004). Binnenschepen springen zuiniger om met energie en de scheepsmotoren blijven verbeteren met steeds minder CO₂-uitstoot en minder lawaai als gevolg (Vandewalle, 2009). De binnenvaart is niet alleen milieuvriendelijker, het heeft ook een veel lagere infrastructuurkost dan wegtransport aangezien waterwegen minder onderhoud vergen (Waterwegen en Zeekanaal NV, z.d.). De externe kosten van de binnenvaart zijn dus beduidend lager dan die van het wegtransport. Het is daarom belangrijk dat nog meer bedrijven de overstap maken naar transport via de binnenvaart. Vlaanderen biedt met haar uitgebreid waterwegennetwerk (1056 km bevaarbare waterwegen) deze mogelijkheid aan ondernemingen (De Scheepvaart NV, 2010).

De Vlaamse overheid heeft veel inspanningen gedaan om de 'modale shift' naar de binnenvaart in Vlaanderen te bevorderen. Denk maar aan het Kaaimurenprogramma (de overheid financiert 80% van de infrastructuurkosten van een nieuwe kaai), de subsidieregeling voor de 'Inland Automatic Identification Systems' voor de binnenschepen en de 'Vlaamse regeling voor steun aan intermodaal vervoer via de waterwegen' hetgeen steun biedt aan het containertransport via de waterwegen (Binnenvaart Vlaanderen, z.d.).

Deze initiatieven hebben hun vruchten afgeworpen. De binnenlandse waterwegen spelen reeds een cruciale rol in het vervoer naar het hinterland vanuit de zeehavens van Antwerpen en Rotterdam (Notteboom, 2007). Meer dan een derde van de containers die Antwerpen binnenkomen, verlaten de haven via de binnenvaart (Vlaams Parlement, 2010). In 2011 werd 72 miljoen ton goederen vervoerd via de binnenvaart in Vlaanderen (Binnenvaart Vlaanderen, 2012). Op het Albertkanaal nam het vervoer met 70% toe op tien jaar tijd (Vlaams Parlement, 2010). In 2010 nam het vervoerde tonnage via het Albertkanaal en de Kempense kanalen toe met 15,5% tegenover 2009 (*"NV De Scheepvaart noteert sterke trafiekstijging in alle productgroepen"*, 2011).

Toch is er nog ruimte voor verbetering. Vele bedrijven zoals bouwbedrijven kennen de voordelen van de binnenvaart namelijk nog niet of durven de stap niet te zetten (Confederatie bouw, 2011). Bouwmaterialen zijn echter ideaal om te vervoeren via de binnenvaart, net zoals andere bulkgoederen. Een barrière voor bedrijven om de overstap te maken naar vervoer via de binnenvaart zijn de wachttijden aan de sluisen. Voor de duwvaart bijvoorbeeld, is wachten een grote belemmering aangezien de duwvaart 'leeft' op grote continuïstroom (Binnenvaart Vlaanderen, 2007). De sluisen (en vooral de bijbehorende wachttijden) in het Albertkanaal zijn daarenboven een struikelblok voor bedrijven om zich in Limburg te vestigen. Aangezien het Albertkanaal zes sluisen (drie tussen Antwerpen en Hasselt en drie tussen Hasselt en Luik) telt, kiezen de meeste bedrijven een ligging zo dicht mogelijk bij Antwerpen (Provincie Antwerpen, 2010).

Er dient dus onderzocht te worden op welke manier de wachttijden aan sluisen gereduceerd kunnen worden om de binnenvaart nóg aantrekkelijker te maken. Hierdoor zal eveneens de geanticipeerde groei in goederenstromen beter kunnen worden opgevangen door de

binnenvaart. Daarenboven zou een vlotte doorgang aan de sluizen in het Albertkanaal de economie in Limburg kunnen stimuleren.

1.2 Onderzoeksvragen

Uit het praktijkprobleem blijkt dat onderzoek in verband met het reduceren van wachttijden aan sluizen nodig is om enerzijds de geanticipeerde groei van de goederenstromen in Vlaanderen op te vangen en anderzijds om de binnenvaart aantrekkelijker te maken voor bedrijven. Om maatregelen die de wachttijden reduceren ex ante te kunnen evalueren is het nodig om de wachttijden aan sluizen correct te modelleren. Vandaar luidt de **centrale onderzoeksvraag**:

“Hoe kunnen de wachttijden aan sluizen voor het binnenvaarttransport gemodelleerd en gereduceerd worden?”

Ten einde deze centrale onderzoeksvraag te beantwoorden, werden volgende **deelvragen** geformuleerd.

- 1) Welke factoren beïnvloeden de wachttijden aan sluizen?
- 2) Welke methoden worden aangehaald in de wetenschappelijke literatuur om wachttijden aan sluizen te reduceren?
- 3) Hoe worden wachttijden aan sluizen in de wetenschappelijke literatuur gemodelleerd?
- 4) Kunnen de aankomsttijden aan de sluizen van het Albertkanaal geschat worden met een kansverdeling?
- 5) Hoe kunnen de wachttijden aan de sluizen van het Albertkanaal gereduceerd worden?

HOOFDSTUK 2: LITERATUURSTUDIE

Deze literatuurstudie gaat op zoek naar antwoorden op de eerste drie deelvragen. In de eerste sectie worden enkele belangrijke begrippen aangehaald in verband met de sluiswerking, sluisoperaties en binnenvaartschepen. Paragraaf 2.2 gaat over de factoren die de wachttijden aan sluisen beïnvloeden. Een onderscheid wordt gemaakt tussen de factoren die de vraag aan sluisen beïnvloeden (zoals reistijd en prijs) en de factoren die het aanbod aan sluisen beïnvloeden (zoals sluisbedieningstijd en prioriteitsregels). In paragraaf 2.3 worden oplossingen aangereikt om wachttijden aan sluisen te reduceren. Het gebruik van alternatieve prioriteitsregels, het inzetten van helperbootjes bij drukke sluisen, een planningssysteem, een online simulatiemodel dat informatie verschaft over de voorspelde congestie op de waterwegen in de komende uren en infrastructurele sluisverbeteringen komen hier aan bod. Om de invloed op de wachttijden van deze oplossingen ex ante te evalueren is het nodig om de wachttijden aan sluisen correct te modelleren. In paragraaf 2.4 worden de belangrijkste modellen besproken waarmee wachttijden aan sluisen gemodelleerd worden. De werking en voor- en nadelen van wachtrijmodellen, simulatiemodellen, metamodellen en neurale netwerk-modellen worden hier aangehaald.

2.1 Inleidende begrippen

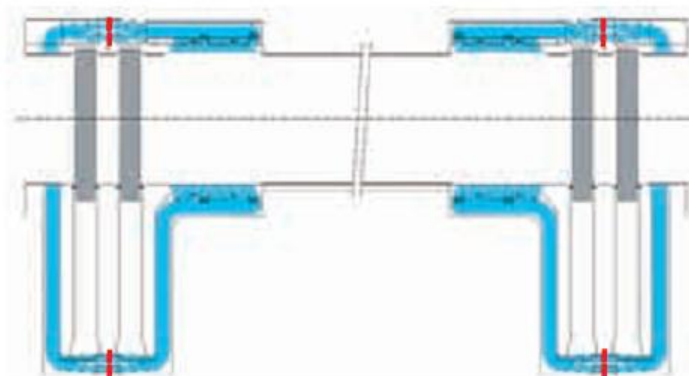
2.1.1 Sluiswerking

Een sluis of sas wordt door Van Dale (2011) gedefinieerd als ‘een kunstmatige, beweegbare waterkering die de verbinding tussen twee wateren of tussen de delen van een water kan afsluiten of openstellen’. Er bestaat een onderscheid tussen zeesluizen en binnenvaartsluizen. Zeesluizen vormen een verbinding tussen een zee enerzijds en een rivier, een kanaal of een dok anderzijds. Een binnenvaartsluis daarentegen ligt tussen twee binnenwateren (Van de Walle & De Mulder, 2008).

Een sluis kan bestaan uit één of meerdere sluiskamers die kunnen verschillen in afmetingen. Als een schip toekomt bij de sluis, zal het – afhankelijk van de beschikbaarheid van de sluis – meteen in de sluiskamer mogen binnenvaren ofwel in de wachtrij plaatsnemen. Als het schip

de sluiskamer binnenvaart, zal de sluisoperator beslissen of nog andere schepen kunnen plaatsnemen in de sluis. Wanneer de sluiskamer vol is, of wanneer geen schepen meer in de wachtrij staan, sluiten de deuren van de sluis en wordt het waterniveau in de kamer verhoogd of verlaagd tot het niveau van de waterweg aan de overkant van de sluis (Theunissen & Janssens, 2005).

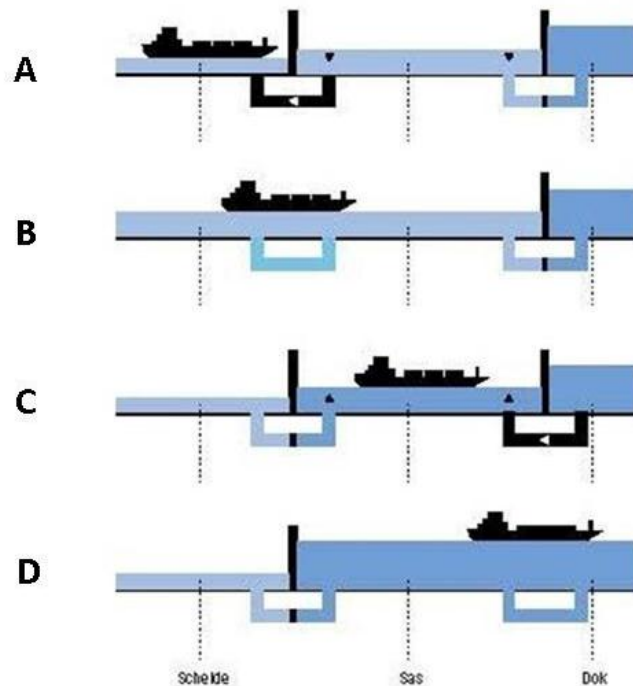
De werking van een sluis steunt op de **wet van de communicerende vaten**. Deze wet stelt dat wanneer twee vaten verbonden zijn met elkaar en er eenzelfde luchtdruk is in beide vaten, de vloeistof in de vaten op dezelfde hoogte zal staan. Het waterpeil in de sluiskamer kan dus op dezelfde hoogte gebracht worden met een aangrenzende waterweg/dok door de sluiskamer met de waterweg te verbinden. Deze verbindingen zijn bijvoorbeeld openingen in de sluisdeuren of omloopriolen. Bij omloopriolen wordt een verbinding gemaakt tussen de sluiskamer en de aangrenzende waterweg/dok door het openen van wielschuiten die zich in de omloopriolen bevinden. Het water wordt dan omheen de sluisdeuren geleid. Op het planzicht van de Berendrechtsluis in figuur 1 worden de sluisdeuren in het grijs weergegeven, de omloopriolen in het blauw en de wielschuiten in het rood. (Van de Walle & De Mulder, 2008)



Figuur 1: Planzicht van de Berendrechtsluis (bron: Van de Walle & De Mulder, 2008)

Figuur 2 illustreert de verschillende stappen die doorlopen worden bij het versassen van een schip op de Schelde dat het havendok wil binnenvaren. In tekening A nadert het schip de sluis en zijn de sluisdeuren nog gesloten. Het waterpeil in de sluiskamer wordt verlaagd tot het waterpeil van de Schelde. In tekening B is het waterpeil in de sluiskamer gelijk aan het

waterpeil van de Schelde en vaart het schip de sluiskamer binnen. De sluisdeur wordt gesloten in figuur C en het waterniveau in de sluiskamer wordt verhoogd. In figuur D tot slot is het waterpeil in de sluiskamer gelijk aan het waterpeil in het havendok en vaart het schip het havendok binnen.



Figuur 2: Werking van een sluis (bron: Vlaamse overheid, departement mobiliteit en openbare werken, z.d.)

2.1.2 Capaciteit van een sluis

Een definitie voor de capaciteit van een sluis kunnen we terugvinden bij Kooman en De Bruijn (1975):

De capaciteit van een sluis is de maximum trafiek, uitgedrukt in aantal schepen of draagvermogen (in ton), dat per tijdseenheid versast kan worden in de heersende omstandigheden wanneer de sluis continu werkt met volle sluiskamers. (p. 14)

De capaciteit van een sluis is volgens deze definitie een gemiddelde waarde die berekend wordt uit een groot aantal versassingen met volle sluis kamers. Het is daarenboven zo dat een specifieke capaciteit enkel geldig is als de omstandigheden exact hetzelfde zijn. Voorbeelden van deze omstandigheden zijn het type schip, de grootte van het schip, de competenties van het sluispersoneel, het aantal personeelsleden, het moment van de dag en de weersomstandigheden. (Kooman & De Bruijn, 1975)

2.1.3 Prioriteitsregels aan sluisen

Verschillende prioriteitsregels kunnen worden toegepast om de volgorde te bepalen waarin de schepen doorheen de sluisen mogen varen. De meest gebruikte prioriteitsregel is FIFO (First In First Out). Bij FIFO mag het schip dat als eerste toekomt bij de sluis, ook als eerste de sluis passeren. De volgorde van aankomst bij de sluis is hier dus van belang. Een andere prioriteitsregel is SPF (Shortest Processing Time First – kortste verwerkingstijd eerst). Bij deze regel wordt voorrang gegeven aan het schip dat de kortste sluisbedieningstijd nodig heeft. Tot slot is een combinatie van bovenstaande prioriteitsregels mogelijk, namelijk een SPF regel met een ‘fairness’ beperking. Deze ‘fairness’ beperking houdt in dat een schip maar door een beperkt aantal schepen mag worden voorbijgestoken in de rij. Stel dat de fairness beperking vier schepen is, dan zullen maximum vier schepen een schip mogen voorbijgaan onder de SPF regel en zal dit schip daarna – ook al staan er nog schepen met een kortere sluisbedieningstijd in de wachtrij achter – toch zijn positie behouden in de wachtrij.

2.1.4 Eigenschappen van binnenvaartschepen

Enkele karakteristieken van binnenvaartschepen die van belang zijn bij de sluisoperaties worden hieronder verder toegelicht.

De afmetingen van een schip zijn belangrijk omdat deze bepalen hoeveel plaats het schip inneemt in de sluis kamer. Indien er nog plaats over is in de sluis kamer kunnen nog andere schepen samen met het schip versast worden. Indien het schip daarentegen groter is dan de sluis kamer, moet het schip ‘gesplitst’ worden om in de sluis te passen. Dit komt voor in Noord-Amerika, waar schepen vaak een aantal keer groter zijn dan een ‘typisch binnenschip’. In

Vlaanderen komt dit niet voor. De meeste artikels die in deze literatuurstudie besproken zullen worden, gaan over het binnenvaartverkeer in Noord-Amerika. Hierdoor zal meerdere keren melding gemaakt worden van schepen die een aantal keer groter zijn dan een 'typisch binnenvaartschip', en het 'splitsen' van dergelijke schepen bij het passeren van een sluis.

Daarnaast speelt ook het type schip een rol. De scheepvaart op de binnenwateren kan worden ingedeeld in twee groepen; de commerciële scheepvaart en de recreatieve scheepvaart. Het versassen van een recreatieve boot neemt gemiddeld aanzienlijk minder tijd in beslag dan het versassen van commerciële binnenvaartschepen (Smith et al., 2009). Recreatievaart is ook sterk afhankelijk van het seizoen, terwijl de commerciële scheepvaart hier minder gevoelig aan is.

2.2 Factoren die een invloed uitoefenen op de wachttijden aan sluisen

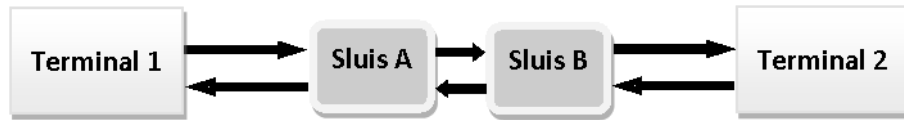
Om de factoren te onderzoeken die een invloed uitoefenen op de wachttijden, is het belangrijk eerst te onderzoeken hoe wachtrijen aan sluisen ontstaan. Wachtrijen ontstaan wanneer gedurende een korte periode de vraag groter is dan het aanbod (Fredj et al., 2001). In tabel 1 worden de belangrijkste factoren weergegeven die de vraag en het aanbod aan sluisen beïnvloeden.

Tabel 1: Factoren die de vraag en het aanbod aan sluisen beïnvloeden

Factoren die de vraag aan sluisen beïnvloeden	Factoren die het aanbod aan sluisen beïnvloeden
Weersomstandigheden (ijzel, wind en zichtbaarheid)	
Rivier (stroom, tij,...)	
Economische groei	Aantal keer dat schip gesplitst moet worden om de sluis te passeren
Prijs	Vaarrichting schip
Reistijd	Ratio schiplengte/sluiskamerlengte
Alternatieve vervoersmodi	Ratio schipbreedte/sluiskamerbreedte
Seizoensgebonden factoren	Lockage type ('fly lockage', 'exchange lockage', 'turnback lockage')
Onbekende risico's	Vlootkarakteristieken (zoals afmetingen schip, aantal ton per eenheid paardenkracht, leeg/vol)
Congestie	Maand
Afhankelijkheid sluisen	Overdag/ 's nachts
	Sluis karakteristieken (zoals afmetingen sluis, aantal kamers, vaardigheden sluisoperator)
	Bedrijfskarakteristieken
	Prioriteitsregels
	Methode voor de plaatsing van de schepen in de sluis
	Variabiliteit van de bedieningstijden

Bij de binnenvaart komt de vraag overeen met het aantal schepen die doorheen de sluisen willen varen op een bepaald ogenblik. Deze vraag wordt volgens Wang en Schonfeld (2007) onder meer beïnvloed door economische groei, transportkosten, reistijd, alternatieve vervoersmodi, weersomstandigheden, toestand van de rivier, onbekende risico's (zoals ongevallen), seizoensgebonden factoren en congestie.

Martinelli en Schonfeld (1995) tonen aan dat de afhankelijkheid van een sluis aan andere sluisen eveneens een invloed uitoefent op de wachttijden aan deze sluis. Afhankelijkheid tussen sluisen wordt geïllustreerd in figuur 3.



Figuur 3: *Afhankelijkheid* sluisen

Stel dat sluisen A en B zeer dicht bij elkaar liggen, de bedieningstijden aan beide sluisen vergelijkbaar zijn en geen los-of laadplaatsen liggen tussen beide sluisen. Het aankomst ritme bij sluis A vanuit de richting van B is dan ongeveer gelijk aan het vertrek ritme bij sluis B in de richting van sluis A. Ook omgekeerd zal het vertrek ritme bij sluis A in de richting van B ongeveer gelijk zijn aan het aankomst ritme bij sluis B vanuit deze richting. Er bestaat bijgevolg een afhankelijkheid tussen beide sluisen. Indien het aantal schepen dat van terminal 2 naar terminal 1 vaart groter is dan de capaciteit van de tussenliggende sluisen, zullen grote wachtrijen ontstaan bij sluis B, maar zal de wachtrij van de sluis A in deze richting meestal leeg zijn. Uiteraard liggen twee sluisen niet altijd zo dicht bij elkaar, zijn de bedieningstijden aan nabijgelegen sluisen niet altijd vergelijkbaar en liggen in realiteit vaak wel los- en laadplaatsen tussen de sluisen in. Toch kan dan nog altijd sprake zijn van afhankelijkheid tussen de sluisen, maar het effect op de wachttijden zal in mindere mate voelbaar zijn. De afhankelijkheid tussen sluisen is dus negatief gerelateerd met de mogelijkheid van schepen om zich te verspreiden tussen twee opeenvolgende sluisen. Afstand tussen de twee sluisen, snelheid van de schepen, volume en mogelijkheden om andere schepen voorbij te steken hebben volgens Martinelli en Schonfeld (1995) allemaal een invloed op de mogelijkheid van schepen om zich te verspreiden of zich te onderscheiden van elkaar en dus op de afhankelijkheid van het sluisensysteem.

Daarnaast oefenen ook een aantal factoren uit het bedieningsproces een invloed uit op de afhankelijkheid tussen nabijgelegen sluisen. De eerste factor is het benuttingspercentage. Dit is de benutting van de capaciteit van de sluis en wordt berekend aan de hand van het quotiënt van het volume dat de sluis passeert en de capaciteit van de sluis. In een sluisensysteem wordt de sluis die het hoogste benuttingspercentage heeft (de 'bottleneck'), de 'kritieke sluis'

genoemd. Hoe hoger het kritieke benuttingspercentage is, hoe veel te groter de afhankelijkheid is tussen de sluizen in het systeem. Een tweede factor is de relatieve benutting van de sluis. Dit is de ratio van het benuttingspercentage van de sluis en het benuttingspercentage van de kritieke sluis in het sluisensysteem. Andere factoren die een invloed uitoefenen op de mogelijkheid voor schepen om zich te verspreiden tussen twee sluizen zijn de gehanteerde prioriteitsregels aan de sluizen, het aantal sluis kamers, de groottes van de sluis kamers en de betrouwbaarheid van de sluizen. (Martinelli & Schonfeld, 1995)

Het aanbod aan sluizen wordt voornamelijk bepaald door de sluisbedieningstijd. De sluisbedieningstijd wordt door Kim en Schonfeld (1995) gedefinieerd als de totale tijd dat een gegeven schip nodig heeft om door een specifieke sluis te varen. Dit wordt volgens hen onder meer beïnvloed door de vaarrichting van het schip, het aantal keer dat het schip gesplitst moet worden om in de sluis kamer te passen, de ratio tussen schiplengte en sluis kamer lengte en de ratio tussen schip breedte en sluis kamer breedte (Kim & Schonfeld, 1995). Wilson (2006) onderzocht met behulp van econometrische technieken welke factoren een significante invloed uitoefenen op de sluisbedieningstijd op basis van panel data over het Upper Mississippi-Illinois Waterway System. Zijn analyse wijst uit dat het aantal keer dat het schip gesplitst moet worden om door de sluis te varen 71% van de variantie in de sluisbedieningstijd verklaart (Wilson, 2006). Dit maakt het veruit de belangrijkste determinant van de bedieningstijd. Andere factoren die een invloed uitoefenen op de sluisbedieningstijd zijn vlootkarakteristieken, het type van versassen, omgevingsomstandigheden (rivier en weer), overdag/'s nachts, vaarrichting, observeerbare en niet-observeerbare sluis karakteristieken en bedrijfskarakteristieken (Wilson, 2006).

De vlootkarakteristieken zijn het aantal keer dat het schip groter is dan een 'typisch binnenschip', het aantal ton per eenheid paardenkracht, het al dan niet leeg zijn van het schip en de lengte van het schip. De types van versassen maken een onderscheid tussen wanneer de sluis leeg is als het schip arriveert ('fly lockage'), wanneer het schip dat de sluis verlaat in de tegenovergestelde richting vaart van het schip dat de sluis binnenvaart ('exchange lockage') en wanneer het schip dat de sluis verlaat in dezelfde richting vaart als het binnenvarende schip ('turnback lockage'). De omgevingsomstandigheden zijn de maand van het jaar, overdag/ 's nachts en het waterpeil van de rivier. Observeerbare sluis karakteristieken zijn de lengte- en

breedteafmetingen van de sluis. Niet-observeerbare sluis karakteristieken zijn factoren die niet direct gemeten kunnen worden zoals vaardigheden van de sluisoperator, faciliteiten en toegankelijkheid van de sluis. Tot slot wees zijn onderzoek ook uit dat schepen systematisch langere of kortere bedieningstijden hadden afhankelijk van welk bedrijf ze afkomstig waren. Er bestaan dus verschillen tussen bedrijven die een invloed hebben op de sluisbedieningstijd. De onderzoeker geeft aan dat deze verschillen tot nog toe niet gekend zijn en dat naar het ontsluiten van deze 'bedrijfseffecten' verder onderzoek gedaan moet worden. De invloed van bovenstaande factoren op de sluisbedieningstijd wordt hieronder kort weergegeven. (Wilson, 2006).

Als het aantal keer dat het schip gesplitst moet worden, het aantal keer dat het schip groter is dan een 'typisch binnenschip', het aantal ton per eenheid paardenkracht, de lengte- en breedteafmetingen van de sluis of de lengte van het schip toeneemt, zal de bedieningstijd ceteris paribus (c.p.) ook toenemen. Een leeg schip zal c.p. een kortere bedieningstijd hebben dan een geladen schip. Een 'turnback lockage' verloopt c.p. sneller dan een 'exchange lockage' wat op zijn beurt sneller verloopt dan een 'fly lockage'. Dit is onlogisch en is te wijten aan een inconsistentie bij het meten van het tijdstip waarop het bedieningsproces begint. De bedieningstijd van een 'fly lockage' wordt gemeten vanaf het moment dat het schip een 'aankomstpunt' gepasseerd is. Dit punt is verder weg van de sluis dan de plaats waar de schepen dienen te wachten voor een 'exchange lockage' of een 'turnback lockage'. Indien het waterpeil van de rivier laag is, zal c.p. de bedieningstijd toenemen omdat het schip trager zal varen. Gedurende de dag en rivieropwaarts neemt het bedieningsproces c.p. minder tijd in beslag. Tot slot wezen de resultaten uit dat de bedieningstijden in januari c.p. het kortst waren en in november en december het langst. (Wilson, 2006)

De prioriteitsregel die gehanteerd wordt aan de sluis heeft eveneens een invloed op de sluisbedieningstijd. De invloed van prioriteitsregels op de wachttijd aan sluizen werd onder meer onderzocht door Ting en Schonfeld (1996, 2001a, 2001b), Smith et al. (2009) en Campbell et al. (2007). FIFO (First In First Out) is de meest voor de hand liggende en faire prioriteitsregel, maar leidt niet tot efficiënt gebruik van de infrastructuur (Campbell et al., 2007). Prioriteitsregels die voorrang geven aan de schepen met de kortste sluisbedieningstijd (SPF - Shortest Processing Time First) of de kortste sluisbedieningstijd per eenheid van een

‘typisch binnenschip’ (indien het binnenschip een aantal keer groter is dan een ‘typisch binnenschip’) zorgen voor kortere wachttijden (Ting et al., 2001a, 2001b).

De planningsmethode die gebruikt wordt om de schepen in de sluis te plaatsen kan ook een invloed uitoefenen op de wachttijden. Theunissen en Janssens (2005) ontwikkelden een ‘less-flexibility-first’ heuristiek voor de plaatsing van de schepen in een sluis. Deze heuristiek heeft als doel om zo veel mogelijk schepen uit de wachtrij in de sluis te plaatsen. Het algoritme geeft prioriteit aan de plaatsingen met de minste flexibiliteit met betrekking tot de plaats in de sluis of tot het schip. De hoeken van een sluis bezitten het minste flexibiliteit, gevolgd door de flanken van de sluis. De open ruimtes in de sluis kamers zijn het meest flexibel. De flexibiliteit van schepen wordt bepaald door de vorm en de grootte van de schepen. Theunissen en Janssens (2005) veronderstellen een rechthoekige vorm van de schepen, waardoor dus enkel nog de lengte- en breedteafmetingen van de schepen van belang zijn. Hoeveel te groter het schip, hoeveel te lager de flexibiliteit. Het algoritme zoekt in een eerste stap naar de hoekpunten in de sluis. Voor elk schip i in de wachtrij wordt nagegaan in welke hoeken het geplaatst kan worden. Een lijst wordt opgesteld van de toegelaten combinaties ‘schip i – hoek j ’. Een ‘schip i – hoek j ’ combinatie is *toegelaten* als schip i geplaatst kan worden in hoek j . Voor elke toegelaten combinatie (i,j) wordt een ‘pseudo-plaatsing’ uitgevoerd. Dit houdt in dat voor elke (i,j) berekend wordt hoeveel andere schepen nog geplaatst kunnen worden in de sluis kamer en wat dan de totale bezetting van de sluis kamer is wanneer de plaatsing van deze combinatie gebeurt. Bij deze ‘pseudo-plaatsing’ wordt voorrang gegeven aan de plaatsing van de grote, minder flexibele schepen. De combinatie (i,j) met de grootste sluisbezetting na de ‘pseudo-plaatsing’, wordt gekozen voor de definitieve plaatsing. Dit betekent dat het schip uit deze combinatie geplaatst zal worden in het hoekpunt van deze combinatie. Het algoritme start dan opnieuw. De hoekpunten in de sluis zijn gewijzigd gezien een nieuw schip in de sluis werd geplaatst en nieuwe toegelaten combinaties zullen ontstaan. (Theunissen & Janssens, 2005)

Ten slotte heeft ook de variabiliteit van de bedieningstijd een invloed op de wachttijd. Indien de variabiliteit van de bedieningstijd toeneemt, zal de totale wachttijd eveneens toenemen. (Ting & Schonfeld, 2001a)

2.3 Oplossingen

De kosten die wachttijden aan sluisen met zich mee brengen zijn een groot probleem in een waterwegennetwerk (Ting & Schonfeld, 1998). Er is bijgevolg al heel wat onderzoek verricht naar het reduceren van deze wachttijden.

Een eerste oplossing die wordt aangereikt is het gebruik van efficiënte prioriteitsregels. Zoals in de vorige paragraaf reeds werd vermeld, zorgen prioriteitsregels die voorrang geven aan de schepen met de kortste sluisbedieningstijd (SPF) voor kortere wachttijden dan de klassieke FIFO regel. De voordelen die gehaald kunnen worden uit het gebruiken van alternatieve prioriteitsregels hangen grotendeels af van de vraag (Campbell et al., 2007). Hoeveel te meer schepen doorheen de sluis varen, hoeveel te meer voordelen geput kunnen worden uit het gebruik van efficiëntere prioriteitsregels dan FIFO (Campbell et al., 2007). Deze regels zijn niet altijd even eerlijk aangezien sommige schippers hierdoor langer dienen te wachten aan sluisen dan andere schippers, die pas na hen arriveerden. Ting en Schonfeld (2001a) onderzoeken daarom de invloed van een 'fairness beperking' op de gehanteerde prioriteitsregel. Deze 'fairness beperking' houdt in dat een schip maximum door vijf schepen mocht voorbij gegaan worden in de rij. Hun resultaten wijzen uit dat de verschillen in wachttijden niet zo groot zijn tussen de prioriteitsregel met 'fairness beperking' (maximumwaarde van vijf schepen) en de prioriteitsregel zonder deze beperking. Ook hier geldt dat hoeveel te meer schepen doorheen de sluis varen, hoeveel te groter de verschillen zijn in wachttijden tussen de prioriteitsregel met 'fairness beperking', en dezelfde zonder beperking. In de praktijk zal een afweging gemaakt dienen te worden tussen de eerlijkheid en de efficiëntie van het wachtrijsysteem. (Ting & Schonfeld, 2001a)

Een tweede manier om de wachttijden te reduceren is het inzetten van helperbootjes of stewards in de sluis (Smith et al., 2009). Helperbootjes worden ingezet bij drukke sluisen om schepen te helpen om de sluis snel en veilig te passeren. Het onderzoek van Smith et al. (2009) over wachttijden aan sluisen in de Upper Mississippi Rivier wees uit dat het inzetten van helperbootjes een verbetering betekende voor de totale wachttijd ten opzichte van het gebruik van alternatieve prioriteitsregels.

Een derde manier die werd aangehaald om de wachttijden te reduceren is een planningsysteem waarbij schippers op voorhand een afspraak dienen te maken om de sluis te passeren (Campbell et al., 2007). Dit zou naast het reduceren van wachttijden ook brandstofbesparingen kunnen opleveren aangezien schippers hun snelheid kunnen aanpassen op basis van het geplande tijdstip waarop ze de sluis mogen passeren (Campbell et al., 2007). Echter door de grote variaties in sluisbedieningstijd en doordat de tijd waarop een schip zich verplaatst vaak afhangt van omgevingsfactoren, betwijfelen Campbell et al. (2007) of een simpel planningsysteem hier wel van toepassing kan zijn.

Een vierde manier om wachttijden te verminderen aan sluizen en vooral de daarbij horende kosten te reduceren is het hanteren van 'online simulatiemodellen' door de 'dispatchers' van bedrijven die grote ladingen via de binnenvaart vervoeren. 'Real time' simulatie biedt de mogelijkheid om beslissingen te ondersteunen in het operationeel, dagdagelijks management. Een belangrijk gegeven voor een dergelijk simulatiemodel is de huidige status van het systeem. De huidige status duidt op de locatie, de status (aankomst, in sluis gevaren, uit sluis gevaren), het aantal keer het schip groter is dan een typisch binnenschip en de richting van de schepen op de waterwegen. Bilbrey en Schonfeld (2009) ontwikkelen een 'real time' simulatiemodel en maakten een gevalstudie op een sluisencomplex in de Ohio rivier. De huidige status werd tijdens de initialisatiefase via het internet in hun simulatiemodel geladen. De locaties van de schepen waren niet altijd even accuraat, maar gaven wel een beeld van hoeveel schepen zich in een bepaald gebied bevonden. Daarnaast hebben ze historische data gebruikt in hun simulatiemodel. Dit zijn bijvoorbeeld de aankomsttijden aan de toegangspunten, de verdelingen van de bedieningstijden aan elke sluis, de verdeling van de snelheden van de schepen en verdelingen van de stoptijden bij havens. De gesimuleerde wachttijden werden vergeleken met de geobserveerde wachttijden en de resultaten toonden aan dat het 'real time' simulatiemodel zeer accuraat is van tijdstip 0 tot 15 uren later. Door de initialisatiemethode is de verwerkingstijd voor dit model beduidend lager dan bij een gewoon simulatiemodel. Dit model heeft volgens de onderzoekers een groot potentieel om beslissingsmakers waardevolle korte termijn informatie te verschaffen. De 'dispatchers' kunnen de vrachten plannen/herplannen op basis van de actuele en voorspelde omstandigheden op de waterwegen. Indien bijvoorbeeld een file voorspeld wordt stroomopwaarts terwijl een schip aan het laden is aan een haven, kan de 'dispatcher' beslissen

om meer te laden om de efficiëntie van de reis te verhogen of om een andere route te nemen. (Bilbrey & Schonfeld, 2009)

Tot slot zorgen infrastructurele sluisverbeteringen voor een capaciteitsuitbreiding van de sluis en dus voor een reductie van de wachttijden. Voorbeelden hiervan zijn het vergroten en/of vernieuwen van de sluis en het verbeteren van de toegankelijkheid ervan. In vergelijking met de verschillende prioriteitsregels en de helperbootjes, hadden infrastructurele verbeteringen in vijf sluisen van de Upper Mississippi Rivier (uitbreiding van de lengte van de sluisen van 600 ft naar 1200 ft) veruit de grootste invloed op de wachttijden van het sluisencomplex in het onderzoek van Smith et al. (2009). Deze oplossing had echter ook de hoogste implementatiekosten (Smith et al., 2009). De verschillende alternatieven dienen bijgevolg geëvalueerd te worden met aandacht naar hun effect op kosten en op wachttijden (Smith et al., 2009). Wanneer de volumes die de sluis passeren de capaciteit van de sluis benaderen, is capaciteitsuitbreiding een kostenefficiënte manier om wachttijden te reduceren (Ting et al., 1998). Wanneer de vraag niet zo groot is en de capaciteit van de sluis niet volledig benut wordt, is het voordeliger om voor een andere oplossing te kiezen.

2.4 Modelleren van wachttijden aan sluisen

Wachttijden aan sluisen worden op vier verschillende manieren gemodelleerd in de wetenschappelijke literatuur. Eerst werden wachttijden gemodelleerd via wachtrijtheorie, maar door de onrealistische beperkingen van deze modellen, geeft deze methode meestal geen betrouwbare resultaten (Martinelli et al., 1993). Daarnaast worden simulatiemodellen gebruikt. Deze simuleren de volledige sluiswerking waardoor ze een realistischere weergave kunnen geven van de werkelijkheid en hun resultaten exacter zullen zijn dan de resultaten op basis van de wachtrijmodellen (Martinelli & Schonfeld, 1995). Een derde manier om wachttijden aan sluisen te modelleren is met behulp van een metamodel. Dit is een model dat geschat is op basis van gesimuleerde data (Martinelli & Schonfeld, 1995). Metamodellen nemen veel minder tijd in beslag dan simulatiemodellen, hetgeen vaak cruciaal is voor beslissingen op operationeel vlak (Dai & Schonfeld, 1998). De keuze tussen een simulatiemodel en een metamodel is daarom een afweging tussen enerzijds efficiëntie van modellering en anderzijds precisie van de sluiswerking (Martinelli et al., 1993). Tot slot worden ook artificiële

neurale netwerk-modellen gebruikt om wachttijden aan sluizen te modelleren (Zhu et al., 1999). Dit spaart eveneens heel wat rekentijd uit in vergelijking met simulatiemodellen. Neurale netwerken zijn daarenboven geschikter voor complexe netwerken dan metamodellen.

2.4.1 Wachtrijtheorie

De Salvo en Lave (1968) stelden als één van de eersten een 'sluis wachtrijmodel' voor. Dit was een model met één bedieningseenheid, Poisson verdeelde aankomsten en exponentieel verdeelde bedieningstijden (M/M/1 model). Wilson (1978, in Khisty & Johnson, 1996) maakte dit model realistischer door het bedieningsproces een algemene verdeling te geven (M/G/1 model). Deze modellen hebben echter enkele tekortkomingen. Ze zijn namelijk enkel toepasbaar op een sluis met slechts één kamer, de assumptie van de Poisson-verdeelde aankomsttijden is niet realistisch voor alle sluizen en ze houden geen rekening met 'stalls' of dienstonderbrekingen van de bedieningseenheid bijvoorbeeld in het weekend of door technische problemen (Martinelli et al., 1993). Daarenboven houden ze geen rekening met afhankelijkheid tussen nabijgelegen sluizen (Martinelli et al., 1993). Aangezien deze afhankelijkheid de wachttijden sterk beïnvloedt (cfr. paragraaf 2.2), zal een model dat het hele sluisencomplex in rekening brengt meer accurate resultaten geven.

Khisty en Johnson (1996) gebruikten een wachtrijmodel voor de schatting van de gemiddelde wachttijd per schip in het weekend bij de 'Chicago sluis' op de Chicago rivier. Ze veronderstellen dat de aankomsten van de schepen aan de sluis een Poisson verdeling volgen en dus dat de tussenaankomsttijden exponentieel verdeeld zijn (M). De bedieningstijden worden verondersteld een algemene (G) verdeling te volgen. Het model bevat tot slot slechts één bedieningseenheid. Het gaat hier dus om een M/G/1 model.

De volgende assumpties worden gemaakt met betrekking tot de analyse van de sluisoperaties:

- De schepen komen willekeurig (random) aan bij de sluis.
- De aankomst van een schip bij de sluis is onafhankelijk van de aankomst van het vorige schip (van hetzelfde type of van elk ander type).

- De schepen worden verdeeld in drie categorieën: commerciële schepen, passagiers- en overheidsschepen en recreatieve schepen.
- De sluisoperaties worden voor beide vaarrichtingen (stroomopwaarts en stroomafwaarts) apart geanalyseerd.
- De gehanteerde prioriteitsregel is FIFO.

De wachttijden aan de sluis in de weekends van juli 1993 werden met het wachtrijmodel geschat op basis van de gemiddelde tussenaankomsttijd, de gemiddelde bedieningstijd en de standaardvariantie van de sluisbedieningstijd.

De wachttijd wordt in het M/G/1 model als volgt berekend (Hillier & Lieberman, 2010).

$$W_q = \frac{\frac{\lambda}{\mu^2}(\sigma^2\mu^2 + 1)}{2(1 - \rho)}$$

Waarbij

W_q Gemiddelde wachttijd in de wachtrij

λ Verwacht aantal aankomsten per tijdseenheid

μ Verwacht aantal personen dat bediend kunnen worden per tijdseenheid

σ^2 Variantie bedieningstijd

ρ Bezettingsgraad

2.4.2 Simulatiemodel

2.4.2.1 Uitleg simulatiemodel

Een simulatiemodel refereert naar een model dat de operaties en karakteristieken van reële systemen nabootst. Een simulatiemodel bevat verschillende componenten. De *entiteiten* zijn de 'dynamische objecten' in het model. Ze worden gecreëerd, bewegen een tijdje rond en verlaten dan meestal het systeem. De status van de entiteiten kan veranderen. De entiteiten

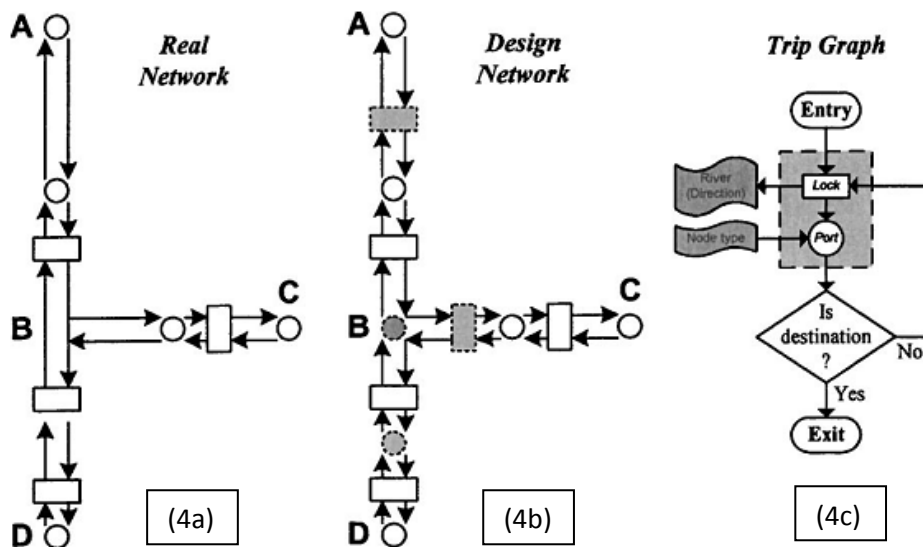
worden beïnvloed door andere entiteiten en door het systeem en ze oefenen een invloed uit op de performantiemaatstaven. *Attributen* zijn de karakteristieken van de entiteiten, waarvan de waarde kan verschillen voor de verschillende entiteiten. Een *bron* of '*resource*' is een dienst waarvoor de verschillende entiteiten vaak met elkaar 'concurreren'. Voorbeelden van bronnen zijn personeel, machines en grondstoffen. Een bron wordt 'gegrepen' door een entiteit wanneer deze de bron gebruikt. Een *wachtrij* ontstaat wanneer een entiteit niet verder kan in het systeem en bijgevolg dient te wachten. Een entiteit kan in een wachtrij komen wanneer deze een machine die al bezet is door een andere entiteit, wil grijpen. Een *variabele* geeft informatie over een bepaalde karakteristiek van het systeem. Voorbeelden van variabelen zijn de simulatieklok, de totale wachttijd en de gemiddelde bedieningstijd. Een *event* is een gebeurtenis op één moment in de tijd die de waarden van de attributen en van de variabelen kan veranderen. Het aankomen van nieuwe onderdelen in het systeem en het aflopen van een bepaalde dienst zijn voorbeelden van events die voorkomen in een simulatiemodel. (Kelton et al., 2010)

2.4.2.2 Simulatiemodellen van het binnenvaartverkeer rond sluisen

Caroll en Bronzini (1973, in Khisty et al., 1996) vonden een oplossing voor een deel van de tekortkomingen van de wachtrijmodellen van het binnenvaartverkeer met de creatie van een simulatiemodel. Dit model simuleert de waterwegenoperaties in detail en geeft onder meer output over wachttijden, bezettingsgraad van de sluis, bedieningstijden en de standaarddeviatie van de wachttijden en bedieningstijden (Khisty et al., 1996). Dit simulatiemodel veronderstelt echter nog altijd Poisson-verdeelde aankomsttijden, wat, zoals hierboven reeds vermeld, niet altijd realistisch is. Het houdt ook geen rekening met dienstonderbrekingen (bijvoorbeeld in het weekend of op zondag) die nochtans een significante invloed uitoefenen op de totale wachttijd (Martinelli et al., 1993). Martinelli et al. ontwikkelden in 1993 een simulatiemodel waarin aankomsttijden per interval in tabellen konden gepreciseerd worden of met standaard statistische distributies konden worden geschat. Dit model houdt onder meer ook rekening met afhankelijkheid tussen sluisen, tweerichtingsverkeer, dienstonderbrekingen en met het aantal kamers in een sluis (Martinelli et al., 1993). In 2009 ontwikkelen Smith et al. (2009) een simulatiemodel waarin eveneens

rekening gehouden wordt met het type van versassen, het scheepstype en de periode van het jaar (dag, maand, seizoen).

Wang en Schonfeld (2002, 2005) ontwikkelden een ‘veralgemeend waterweg simulatiemodel’. Dit model werd ontworpen om de performantie van een waterweg te evalueren. Het model heeft als invoergegeven de geometrie van het waterwegennetwerk en kan daarom worden toegepast op elk sluisennetwerk. Het algoritme voor het transformeren van het netwerk wordt weergegeven in figuren 4a en 4b. De geometrie van het netwerk wordt veranderd door het invoeren van dummy havens, dummy sluisen en dummy rivieren. ‘Dummy’ variabelen zijn variabelen die enkel de waarden nul of één kunnen aannemen en op die manier de aanwezigheid (waarde één) of afwezigheid (waarde nul) van iets bepalen. Als bijvoorbeeld de dummy variabele ‘haven’ de waarde één aanneemt, betekent dit dat er een haven is, indien het de waarde nul aanneemt, is er geen haven. Het netwerk wordt tot slot in figuur 4c opgedeeld in modules die elk bestaan uit een haven en een sluis.



Figuur 4: Voorbeeld van reiswegen in een boomnetwerk (bron: Wang et al., 2005)

Om de logica van het ontwerp van het simulatiemodel te testen, werden eerst de resultaten vergeleken met bekende wachtrijmodellen (meer bepaald met het M/M/1, M/D/1 en M/M/2 model). De resultaten van het simulatiemodel kwamen overeen met deze op basis van de

wachtrijmodellen op een 95% significantieniveau. De wachttijden werden dus goed geschat door het simulatiemodel. Daarna werd het simulatiemodel gevalideerd door de resultaten te vergelijken met de observaties van het 'Lock Performance Monitoring System' (LPMS) van 1998. Een sluisennetwerk met vijf sluisen (sluis 24, 25, 26 en 27 op de Mississippi rivier en de Lagrange sluis op de Illinois rivier) werd hiervoor geselecteerd. Wang en Schonfeld (2002) geven aan dat de simulatiere resultaten de meeste sluis karakteristieken correct beschrijven. De verschillen die er zijn, wijten ze onder meer aan variatie in de seizoenen, aan onbekende details van de sluisoperaties en aan mogelijke verschillen waarop bepaalde events (zoals aankomst en vertrek van schepen) gedefinieerd, geïnterpreteerd en opgeslagen worden aan de verschillende sluisen in de LPMS database. Ze concluderen dat voor complexe systemen, zoals waterwegen, dit simulatiemodel slechts een benadering kan zijn van het echte systeem. (Wang & Schonfeld, 2002)

In 2007, voegen Wang en Schonfeld een dynamische vraagfunctie toe aan het 'veralgemeend waterweg simulatiemodel' dat ze ontwierpen in 2002. Het aangepaste simulatiemodel houdt rekening met de elasticiteit van de vraag en de veranderingen in de vraag door wijzigingen in reis- en wachttijden en door sluitingen van de sluis (zowel voorziene sluitingen voor onderhoud e.d. als onvoorziene sluitingen voor verschillende redenen). Hun resultaten tonen aan dat een vraagelasticiteit van -0,1 ten opzichte van de reistijd een significante reductie van het verkeer teweegbrengt tijdens sluitingen van de sluis, wat het realisme en de validiteit van de simulatie sterk verbetert (Wang & Schonfeld, 2007).

Bilbrey et al. (2007) ontwikkelden tot slot een online simulatiemodel dat een goede schatting geeft van de wachttijden op de waterwegen voor de komende uren. Dit model werd reeds besproken bij de oplossingen om de wachttijden te reduceren aan sluisen (cfr. paragraaf 2.3).

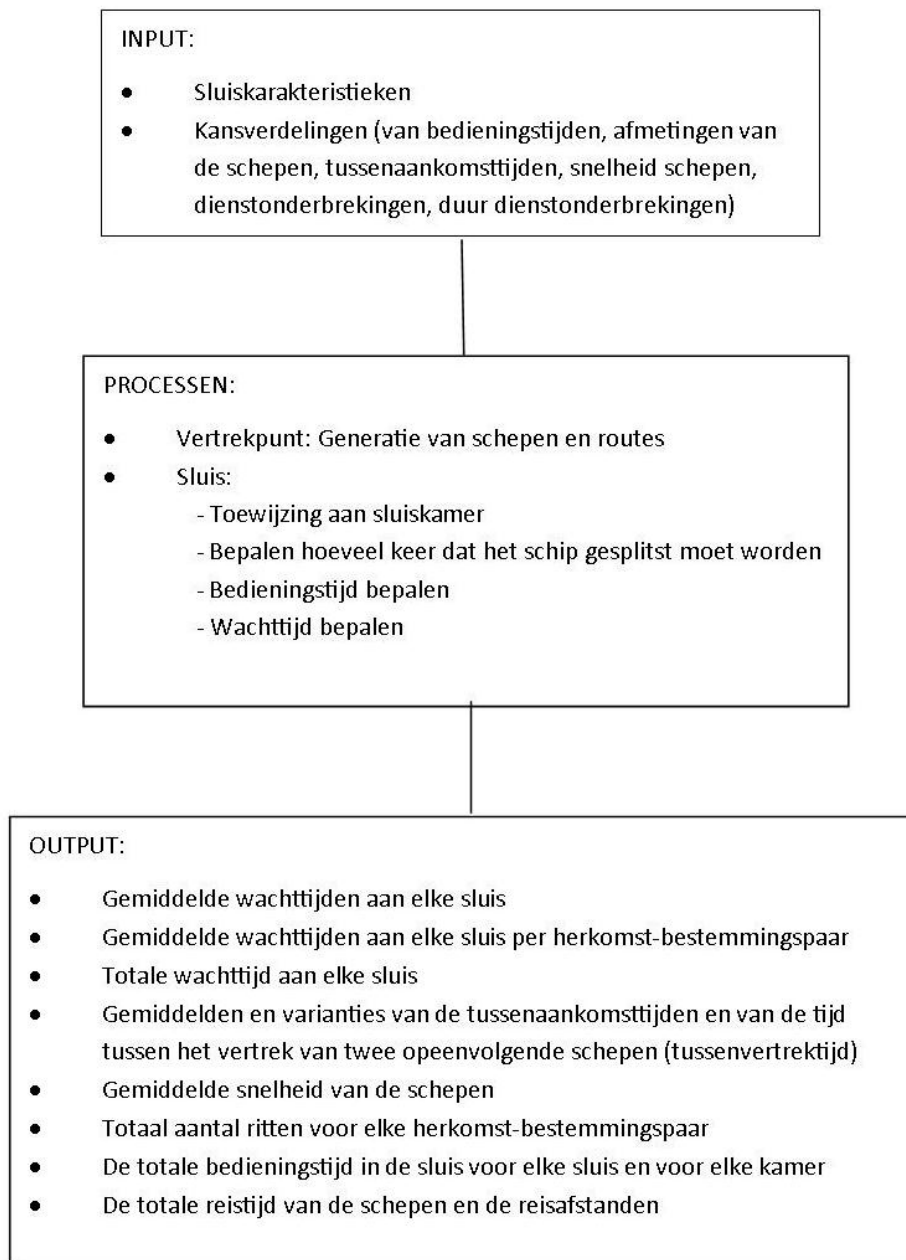
Verschiedende simulatiemodellen werden ontwikkeld om het binnenvaartverkeer rond sluisen te analyseren. Om een goed beeld te krijgen van de opstelling van een dergelijk simulatiemodel, werd het simulatiemodel van Martinelli et al. (1993), beschreven door Dai (1993), gekozen om tot in detail te bespreken in deze thesis. Dit simulatiemodel werd ontworpen op basis van een sluisencomplex op de Mississippi rivier in de Verenigde Staten. Het model is *microscopisch*, wat betekent dat het de bewegingen bijhoudt van elk individueel

schip. Het houdt daarenboven de karakteristieken bij van het schip zoals het type goederen dat het vervoert, de snelheid, de herkomst, de bestemming, de reisrichting en aankomsttijden op verschillende punten. Het simulatiemodel is daarenboven *'event-scanning'*. De status van het systeem wordt dus geüpdatet door events of gebeurtenissen. De status van het systeem duidt onder meer op de simulatieklok, de beweging van de schepen en de operaties in de sluisen. Het model beschrijft een waterweg waarlangs steenkoolopslagplaatsen gevestigd zijn voor fabrieken die zich in de nabijheid van de waterweg bevinden. Via de binnenvaart wordt de steenkool verscheept naar deze opslagplaatsen. De schepen die de steenkool vervoeren worden opgenomen in het simulatiemodel. Op die manier wordt onder andere bijgehouden hoe groot de voorraad steenkool in de opslagplaatsen is op elk moment van de simulatie. In de bespreking in deze masterthesis zal echter niet verder worden ingegaan op deze opslagplaatsen, gezien het enkel een toevoeging is aan het model en niet bijdraagt tot een beter begrip van de werking van een simulatiemodel.

De belangrijkste assumpties waarop het model gebaseerd is, worden hieronder opgesomd:

- De bedieningstijden, de afmetingen van de schepen en de tussenaankomsttijden volgen een algemene verdeling (G). Aangezien de kansverdelingen via tabellen exogeen ingegeven dienen te worden, is dit model makkelijk toepasbaar op een ander sluisencomplex.
- Het schip behoudt dezelfde afmetingen doorheen het sluisencomplex.
- De prioriteitsregel FIFO wordt gehanteerd.
- Indien de sluis meerdere kamers heeft, wordt de 'hoofdkamer' altijd geprefereerd boven de andere kamers.
- De wachtrijlengte is ongelimiteerd.
- De snelheid van schepen volgt een normale distributie.
- De snelheid van een schip blijft constant tussen het vertrekpunt en de bestemming.
- De tijdsintervallen tussen twee opeenvolgende 'stalls' of dienstonderbrekingen en de duur van deze dienstonderbrekingen zijn exponentieel verdeeld.

De structuur en de elementen van het simulatiemodel worden in figuur 5 weergegeven.



Figuur 5: Structuur en elementen van het simulatiemodel (bron: Dai, 1993, eigen bewerking)

De belangrijkste events of gebeurtenissen in dit simulatiemodel en de routines die hiermee gepaard gaan worden hieronder toegelicht.

De eerste gebeurtenis is het genereren van binnenschepen die het sluisencomplex binnenvaren. Schepen kunnen op meerdere plaatsen gegenereerd worden, en nemen vanzelfsprekend niet allemaal dezelfde route. Hierdoor ontstaan herkomst-bestemmingsparen, waarbij de schepen die dezelfde herkomst en bestemming hebben, als één groep worden beschouwd. De distributie van de generatie van de schepen kan voor elk herkomst-bestemmingspaar verschillen en kan gespecificeerd worden met een kansverdeling in een tabel. De generatie is een stochastisch proces met een constant gemiddelde voor elke tijdsperiode in de simulatie. De grootte en snelheid van het schip worden eveneens gegenereerd. De gemiddelde schipgrootte is constant voor elk herkomst-bestemmingspaar en wordt stochastisch gegenereerd op basis van kansverdelingen die gespecificeerd worden voor elk herkomst-bestemmingspaar. De snelheid van de schepen volgt een normale verdeling in dit model. Om echter te vermijden dat extreme waarden gegenereerd worden, wordt een ondergrens (2,5 percentiel) en bovengrens (97,5 percentiel) voorzien. Indien een snelheid gegenereerd wordt die buiten deze grenzen valt, wordt een nieuwe snelheid gegenereerd voor dit schip. Nadat de karakteristieken gegenereerd zijn van het schip, wordt de eerstvolgende sluis bepaald waar het schip zal passeren alsook de aankomsttijd aan deze sluis. Tot slot wordt aan de hand van de aankomsttijd aan de sluis de volgorde aan deze sluis bepaald.

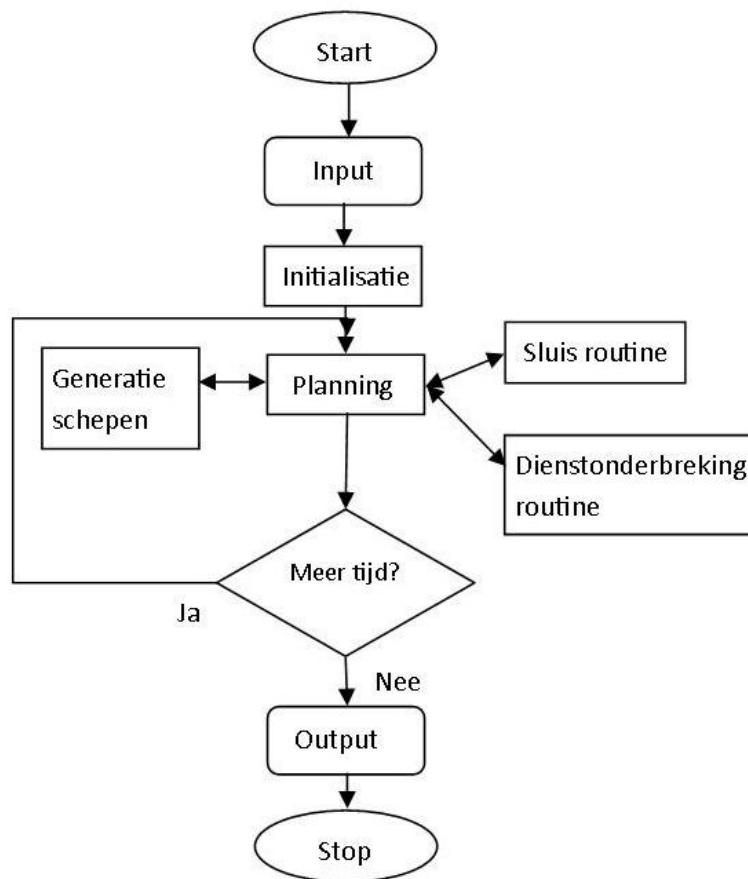
Een tweede type gebeurtenis is de aankomst van het schip bij een sluis. Er zijn verschillende routinestappen die dan doorlopen dienen te worden. Eerst wordt het schip toegewezen aan een sluiskamer indien de sluis meerdere kamers heeft. Deze toewijzing hangt af van de beschikbaarheid van de kamers en van de verwachte bedieningstijd (afhankelijk van het aantal keer dat het schip gesplitst dient te worden om in de kamer te passen). Nadat de sluiskamer werd toegewezen, wordt het tijdstip bepaald waarop het schip de sluiskamer zal binnenvaren. Als het schip de sluis bereikt alvorens de sluiskamer beschikbaar is, wordt het schip in de wachtrij geplaatst. De wachttijd, de belangrijkste output van het simulatiemodel, wordt dan berekend. Hierna wordt de tijd bepaald waarop de kamer terug beschikbaar is voor het volgende schip. Dit is de som van het tijdstip waarop het schip de sluiskamer binnenvaart, de bedieningstijd in de sluis en indien er een 'stall' of onderbreking van de bedieningseenheid is, de duur van deze onderbreking. De bedieningstijd in de sluis kan gegenereerd worden aan de hand van geobserveerde bedieningstijden of via een standaard statistische verdeling. Deze kunnen variëren voor de verschillende sluisen en voor verschillende types en afmetingen van

schepen. De tussenaankomsttijd tussen twee opeenvolgende schepen wordt hierna berekend. Dit is het tijdsinterval tussen de aankomst van het schip dat momenteel bij de sluis is aangekomen, en het schip dat net ervoor was aangekomen. Tot slot wordt ook bepaald welke de volgende stop (sluis, laad- of loskaai) is van het schip en wanneer en het schip hier zal aankomen.

De laatste belangrijke gebeurtenis in het simulatiemodel zijn de 'stalls' of de dienstonderbrekingen in de sluisen. Deze dienstonderbrekingen zijn willekeurige defecten waardoor de sluis kamers niet beschikbaar zijn om de schepen te bedienen. De wachttijden en de variabiliteit van de bedieningstijd nemen dus toe als deze dienstonderbrekingen toenemen. De karakteristieken van deze dienstonderbrekingen verschillen tussen de verschillende kamers en worden gedefinieerd in termen van duur en frequentie. Beiden hangen af van de weersomstandigheden en de fysieke conditie van de kamer. Een dergelijk incident is zeer moeilijk te voorspellen. De dienstonderbrekingen volgen in dit simulatiemodel daarom een exponentiële verdeling.

Tot slot is er nog een routine die zorgt voor het overzicht en die de planning uitvoert. Deze routine controleert de simulatieklok en roept, wanneer nodig, de bovenstaande gebeurtenissen en bijbehorende operaties in.

Bovenstaande gebeurtenissen worden schematisch weergegeven in figuur 6.



Figuur 6: Schematische weergave events of gebeurtenissen in simulatiemodel (bron: Dai, 1993, eigen bewerking)

De validatie van dit simulatiemodel gebeurde op twee manieren. Eerst werden de resultaten vergeleken met de resultaten vanuit de wachtrijtheorie. Daarna werden ze vergeleken met de geobserveerde data om na te gaan in welke mate het model de werkelijke sluiswerking kan simuleren.

De wachttijden aan één sluis van het simulatiemodel wanneer het zich in steady-state bevindt, worden vergeleken met de wachttijden van de wachtrijtheorie met Poisson verdeelde aankomsten en algemeen verdeelde bedieningstijden. De resultaten wijzen uit dat deze wachttijden zeer dicht bij elkaar liggen. Dit wijst erop dat de algemeen verdeelde bedieningstijden vanuit een M/G/1 model op een juiste manier gegenereerd worden in het

model. Als tweede worden de gesimuleerde wachttijden aan vijf sluizen in de Mississippi rivier vergeleken met de geobserveerde wachttijden. Deze resultaten verschilden slechts voor één sluis op het 95% significantieniveau van elkaar. Dit wil zeggen dat voor vier van de vijf sluizen, het model de realiteit zeer goed weergaf, tot op 95% nauwkeurig. De verklaring voor de grotere afwijking van de wachttijden van de vijfde sluis, was dat in de vijfde sluis ongewone praktijken gebeurd waren, zoals het laten wachten van schepen terwijl de sluiskamer leeg was.

Simulatiemodellen zijn zeer interessant voor analyses van systemen waarvoor geen exacte mathematische formules bestaan of waarvoor in mathematisch modellen onrealistische veronderstellingen gemaakt moeten worden (Martinelli & Schonfeld, 1995). Door de stochastische aard van het 'sluis wachtrijprobleem', kan een simulatiemodel gedetailleerde, realistische output verschaffen waar een mathematisch model dit niet kan (Martinelli & Schonfeld, 1995). Het nadeel van simulaties is dat het veel tijd in beslag neemt. Hoewel het model slechts een paar minuten nodig heeft per run, loopt de tijd snel op indien alternatieve investeringsprojecten geëvalueerd worden in een complex netwerk (Martinelli & Schonfeld, 1995).

2.4.3 Metamodel

Een alternatief voor een simulatiemodel is een metamodel. Dit is een model geschat op basis van gesimuleerde data (Law & Kelton, 1991, in Martinelli & Schonfeld, 1995). Een simulatiemodel wordt hierin gezien als een functie met een onbekende expliciete vorm die input parameters omzet in output parameters en op basis hiervan worden eenvoudige formules (= metamodellen) ontwikkeld die deze functie benaderen (Dai et al., 1998). De grootste moeilijkheid bij het ontwikkelen van een metamodel zit in het vinden van een gepaste structurele vorm voor deze benaderende functies (Martinelli et al., 1993).

Martinelli & Schonfeld (1995) ontwikkelden een metamodel voor het schatten van de wachttijden in een sluizencomplex dat rekening houdt met de afhankelijkheid tussen sluizen. Ze hebben eerst op basis van een simulatiemodel gemeten in hoeverre de wachttijden aan een specifieke sluis beïnvloed worden door veranderingen van de karakteristieken (afstand tussen twee sluizen, kritische bezettingsgraad, relatieve bezettingsgraad) van de andere sluizen. De

gegevens die uit deze simulatie voortkwamen, werden dan gebruikt om het metamodel te schatten. (Martinelli & Schonfeld, 1995)

Dai en Schonfeld (1998) ontwierpen een numerieke methode voor het schatten van wachttijden aan sluisen in een waterwegsysteem. Deze methode is opgebouwd uit verschillende metamodellen en bevat drie grote modules: een module voor de aankomstprocessen, de vertrekprocessen en de wachtrijfuncties. De aankomstprocessen aan een bepaalde sluis hangen af van de verdelingen van de tussenvertrektijden aan de twee aangrenzende sluisen (stroomopwaarts en stroomafwaarts). De vertrekprocessen hangen af van de interacties tussen de verdelingen van de tussenaankomsttijden aan de sluis en de verdeling van de bedieningstijd aan de sluis. De wachtrijfuncties tot slot definiëren de relaties tussen wachttijden, de verdelingen van de tussenaankomsttijden, de verdelingen van de tussenvertrektijden en de verdeling van de bedieningstijd. In de eerste twee modules wordt het gemiddelde en de variantie van de verdelingen van de tussenaankomsttijden en van de tussenvertrektijden aan elke sluis bepaald. Op basis hiervan wordt in de derde module een schatting gemaakt van de wachttijden.

De belangrijkste assumpties van deze methode worden hieronder weergegeven:

- De tussenaankomsttijden en bedieningstijden volgen een algemene verdeling (G).
- Er is slechts één verdeling voor de bedieningstijden aan de sluis die van toepassing is op de sluisoperaties in beide vaarrichtingen (stroomopwaarts en stroomafwaarts).
- Alle schepen zijn identiek en hebben bijgevolg eenzelfde verdeling van de bedieningstijden.
- Elke sluis heeft één kamer.
- Instroom en uitstroom van schepen gebeurt enkel aan de twee eindpunten van het waterwegsysteem.
- De gemiddelde volumes die stroomopwaarts vervoerd worden zijn gelijk aan de gemiddelde volumes die stroomafwaarts vervoerd worden.
- De lange termijn volume-over-capaciteit ratio is kleiner dan 1,0 aan elke sluis.

De modules maken gebruik van metamodellen. De procedure die Dai et al., 1998 gebruikt hebben voor het opstellen en selecteren van de metamodellen wordt hieronder weergegeven.

- Wachtrijtheorie wordt gebruikt om input variabelen te definiëren die een invloed hebben op de output variabelen en om functionele relaties voor te stellen tussen de input- en outputvariabelen.
- De outputvariabelen worden geplot tegen de inputvariabelen om onderlinge relaties te ontdekken.
- Pearson correlatietabellen worden opgesteld, waardoor correlaties tussen input- en outputvariabelen bevestigd kunnen worden en eventuele multicollineariteit kan ontdekt worden.
- De parameters van de voorgestelde functionele relaties (of metamodellen) worden geschat. Het 'beste' meta-model wordt geselecteerd. Deze selectie gebeurt voornamelijk op basis van de determinantiecoëfficiënt (R^2). De determinantiecoëfficiënt is het percentage van de variantie in de afhankelijke variabele dat verklaard wordt door de onafhankelijke variabelen. Hoe hoger de determinantiecoëfficiënt, hoe beter de onafhankelijke variabelen de afhankelijke variabele kunnen voorspellen. Daarom wordt meestal voorkeur gegeven aan het meta-model met de hoogste R^2 . Een tweede factor van belang bij het selecteren van een meta-model, is de significantie van de onafhankelijke variabelen in het meta-model. Een variabele is significant als hij in het meta-model een belangrijk deel van de variatie in de afhankelijke variabelen kan voorspellen.
- Tot slot wordt nagegaan of aan de regressievoorwaarden voldaan wordt van homoscedasticiteit en normaliteit met behulp van een residuele analyse.

In de eerste module wordt, zoals hierboven reeds vermeld, het gemiddelde en de variantie van de tussenaankomsttijden geschat. Dit gebeurt in twee stappen. In de eerste stap wordt het gemiddelde en de variantie van de tussenaankomsttijden aan de sluizen voor beide vaarrichtingen (stroomopwaarts en stroomafwaarts) afzonderlijk geschat. Indien we ervanuit gaan dat de stroom behouden blijft tussen de sluizen (assumptie 5), en de volume-overcapaciteit ratio kleiner is dan één (assumptie 7), zijn de gemiddelde tussenaankomsttijden aan

sluis i gelijk aan de gemiddelde vertrektijden aan de aangrenzende sluisen in de richting van sluis i . In onderstaande formule wordt dit weergegeven. (Dai et al., 1998)

$$\bar{t}_{aji} = \bar{t}_{ajk} \begin{cases} k = i - 1, & \text{if } j = 1 \\ k = i + 1, & \text{if } j = 2 \end{cases} \quad (1)$$

Met

\bar{t}_{aji} gemiddelde tussenaankomsttijd voor richting j en sluis i

\bar{t}_{ajk} gemiddelde tussenvertrektijd voor richting j en sluis k

j richtingsindex (1 = stroomafwaarts, 2 = stroomopwaarts)

Om een schatting te maken van de variantie van de tussenaankomsttijden, wordt gebruik gemaakt van een metamodel. Na het doorlopen van de hogervermelde procedure voor het opstellen van een metamodel, selecteerden Dai et al. (1998) onderstaand metamodel.

$$\sigma_{aji} = \sigma_{ajk} + 0,00251 \ln \left(1 + \frac{D_{ik}\sigma_{vik}}{\mu_{vik}} \right) \begin{cases} k = i - 1, & \text{if } j = 1 \\ k = i + 1, & \text{if } j = 2 \end{cases} \quad (2)$$

$$R^2 = 0.999954, \quad n = 107$$

Met

σ_{aji} standaardafwijking van de tussenaankomsttijden voor richting j en sluis i

σ_{ajk} standaardafwijking van de tussenvertrektijden voor richting j en sluis k

D_{ik} afstand tussen sluisen i en k

μ_{vik} gemiddelde snelheid van de schepen tussen sluisen i en k

σ_{vik} standaardafwijking van de snelheid van de schepen tussen sluisen i en k

j richtingsindex (1= stroomafwaarts, 2= stroomopwaarts)

Dit model is voornamelijk ontwikkeld op basis van empirische analyse en is dus minder gebaseerd op wachtrijtheorie.

In een tweede stap wordt het algemeen gemiddelde en variantiecoëfficiënt van de tussenaankomsttijden aan de sluis geschat. Het algemeen aankomstritme aan een sluis is de som van de gemiddelde aankomstrijtmes vanuit de twee vaarrichtingen (stroomafwaarts en stroomopwaarts). Onderstaand metamodel geeft de schatting weer voor de gekwadraterde algemene variatiecoëfficiënt van de verdeling van de aankomsttijden aan een sluis. (Dai et al., 1998)

$$C_{Ai}^2 = 0,179 + 0,41(C_{a1i}^2 + C_{a2i}^2) \quad (3)$$

$$R^2 = 0.9188, \quad n = 79$$

Met

C_{Ai}^2 Gekwadraterde variatiecoëfficiënt van de tussenaankomsttijden aan sluis i

C_{aji}^2 Gekwadraterde variatiecoëfficiënt van de tussenaankomsttijden aan sluis i in richting j

j richtingsindex (1 = stroomafwaarts, 2 = stroomopwaarts)

In de tweede module wordt het gemiddelde en de variantie van de tussenvertrektijden aan elke sluis geschat. De gemiddelde tussenvertrektijd is gelijk aan de gemiddelde tussenaankomsttijd als we ervanuit gaan dat de stroom behouden blijft tussen de sluizen (assumptie 5), en de volume-over-capaciteit ratio kleiner is dan 1,0 (assumptie 7). Voor de schatting van de variatiecoëfficiënt van de tussenvertrektijden wordt een metamodel opgesteld. Dit metamodel is hieronder terug te vinden. (Dai et al.,1998)

$$C_D^2 = 0,207 + 0,795 (C_A^2(1 - \rho) + \rho) + 1,001 (C_S^2 \rho^2 - \rho^2) \quad (4)$$

$$R^2 = 0.9984, \quad n = 79$$

Met

C_D^2 Gekwadrateerde variatiecoëfficiënt van de tussenvertrektijden

C_A^2 Gekwadrateerde variatiecoëfficiënt van de tussenaankomsttijden

C_S^2 Gekwadrateerde variatiecoëfficiënt van de sluisbedieningstijden

ρ Volume-over-capaciteit ratio

Tot slot wordt in de tweede module ook een metamodel opgesteld voor de schatting van de variantiecoëfficiënt van de tussenvertrektijden voor elke vaarrichting (stroomopwaarts, stroomafwaarts) afzonderlijk. Dit metamodel is hieronder terug te vinden. (Dai et al., 1998)

$$C_{dji}^2 = 0,518 + 0,491 C_{aji}^2 C_{Di}^2 \quad (5)$$

$$R^2 = 0.9710, \quad n = 158$$

Met

C_{dji}^2 Gekwadrateerde variatiecoëfficiënt van de tussenvertrektijden van sluis i in richting j

C_{aji}^2 Gekwadrateerde variatiecoëfficiënt van de tussenaankomsttijden aan sluis i in richting j

C_{Di}^2 Gekwadrateerde variatiecoëfficiënt van de tussenvertrektijden aan sluis i

ρ Volume-over-capaciteit ratio

j richtingsindex (1 = stroomafwaarts, 2 = stroomopwaarts)

In de derde module wordt tot slot een formule aangereikt om de gemiddelde wachttijd aan een sluis te schatten. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van onderstaande formule van Marshall (Marshall, 1968 in Dai et al., 1998).

$$W = \frac{\sigma_A^2 + \sigma_S^2 - \sigma_D^2}{2\bar{t}_A(1-\rho)} \quad (6)$$

Met

σ_A standaardafwijking van de tussenaankomsttijden

σ_S standaardafwijking van de sluisbedieningstijden

σ_D standaardafwijking van de tussenvertrektijden

\bar{t}_A gemiddelde tussenaankomsttijd

ρ Volume-over-capaciteit ratio

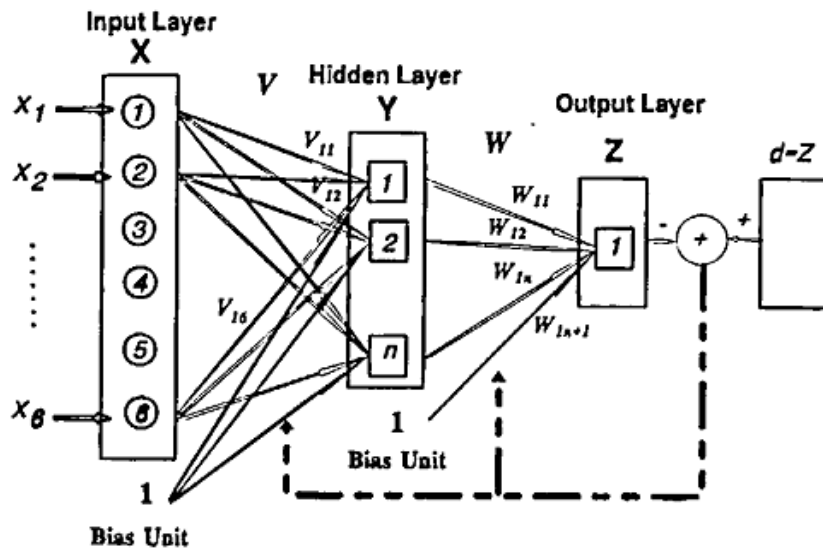
De gemiddelde wachttijd wordt dus geschat op basis van de verdelingen van de tussenaankomsttijden, tussenvertrektijden en sluisbedieningstijden en op basis van de volume-over-capaciteit ratio. Als we echter de metamodellen voor de variantiecoëfficiënten van de tussenaankomsttijden (vgl. 2 en 3) en tussenvertrektijden (vgl. 3 en 4) van naderbij bekijken, zien we volgend fenomeen: De variantiecoëfficiënt van de tussenaankomsttijden aan een sluis i , wordt beïnvloed door de variantie van de tussenvertrektijden van de aangrenzende sluisen (stroomopwaarts en stroomafwaarts). De variantiecoëfficiënten van de tussenvertrektijden van de aangrenzende sluisen worden echter beïnvloed door de variantie van de tussenaankomsttijden aan deze sluisen, die op hun beurt beïnvloed worden door de tussenvertrektijden van sluis i . De varianties van de tussenaankomsttijden van aangrenzende sluisen zijn dus afhankelijk van elkaar. Dai et al. (1998) hebben daarom een iteratieve scanningsprocedure opgesteld voor het bepalen van de varianties van de tussenvertrektijden in waterwegsystemen waarin tweerichtingsverkeer is. Eerst wordt de gemiddelde tussenaankomsttijd en tussenvertrektijd voor elke vaarrichting afzonderlijk geschat. Dan wordt de algemeen gemiddelde tussenaankomsttijd (en dus ook tussenvertrektijd) aan elke sluis geschat. Dan start de iteratieve procedure voor het schatten van de variantie van de tussenaankomsttijden. Een initiële waarde wordt gekozen voor de varianties van de tussenvertrektijden. Hierna wordt het waterwegstelsel in de twee vaarrichtingen na elkaar doorlopen en wordt per sluis de variantie van de tussenaankomsttijden (op basis van de initiële waarde van de variantie van de tussenvertrektijden) en van de tussenvertrektijden (op basis van de variantie van de tussenaankomsttijden) geschat. Deze procedure wordt herhaald met telkens de schattingen van de varianties van de tussenvertrektijden uit de voorgaande

iteratie. De procedure stopt als de geschatte varianties van de tussenvertrektijden in opeenvolgende iteraties convergeren.

Dit model werd getest op een sluizencomplex van drie sluizen met tweerichtingsverkeer. Verschillende scenario's werden gemaakt door het variëren van de waarden van de invoervariabelen (de volume-over-capaciteit ratio, de afstand tussen het begin-en eindpunt van het sluizencomplex, de variantie van de sluisbedieningstijden, de gemiddelde vaarsnelheid en het gemiddeld aantal schepen dat in de twee richtingen per dag doorheen het sluizencomplex varen). De geschatte wachttijden van de numerieke methode werden vergeleken met de wachttijden die door een simulatiemodel werden berekend. De resultaten wezen uit dat het numerieke model een goede schatting geeft van de wachttijden. Het model gaf de slechtste resultaten bij de scenario's waar de volume-over-capaciteit ratio laag was en de wachttijden bijna gelijk waren aan nul. In de scenario's met veel congestie waren de afwijkingen van de resultaten van het numerieke model met het simulatiemodel zeer klein. Het model kan dus gebruikt worden om voor een waterwegstelsel waar veel congestie is, een screening te maken van alternatieve projecten om de congestie te verminderen. Hierna kunnen dan de 'overgebleven alternatieven' op basis van een uitgebreid simulatiemodel met elkaar vergeleken worden. (Dai et al., 1998)

2.4.4 Artificieel neurale netwerk-model

De laatste manier die in deze thesis zal worden besproken om wachttijden te schatten in een sluizencomplex is een artificieel neurale netwerk-model. Een neurale netwerk heeft net zoals een metamodel het voordeel dat veel minder rekentijd vereist is in vergelijking met simulatie (Zhu et al., 1999). Hoe complexer het netwerk echter wordt, hoe moeilijker het is om een metamodel te ontwikkelen. Een artificieel neurale netwerk-model kan hiervoor een oplossing bieden. Kim en Schonfeld (1995) ontwikkelden een neurale netwerk om de bedieningstijd aan een sluis te schatten. Het neurale netwerk bestond uit drie lagen: de invoerlaag ('input layer'), de verborgen laag ('hidden layer') en de outputlaag ('output layer'). Dit wordt weergegeven in figuur 7.



Figuur 7: Structuur van een neurale netwerkmodel uit Kim & Schonfeld (1995)

De invoervariabelen zijn vaarrichting, vaarrichting van vorig schip (zelfde of tegengesteld), aantal keren dat het schip gesplitst moest worden om in de sluiskamer te passen, aantal keer dat het schip groter is dan een 'typisch binnenvaartschip', ratio van de schiplengte en lengte van de sluiskamer, ratio van de schipbreedte en breedte van de sluiskamer. Deze variabelen oefenen een invloed V_{ij} uit op de variabelen in de verborgen laag en deze variabelen oefenen op hun beurt een invloed W_i uit op de outputvariabele, de bedieningstijd. Het 'backpropagation' algoritme wordt gebruikt om het neurale netwerk te trainen of optimaliseren. Dit wil concreet zeggen dat het model de output van het neurale netwerk vergelijkt met de reële bedieningstijd en aan de hand van de fout ('bias') de parameters V_{ij} en W_i verandert teneinde een betere schatting van de bedieningstijd te bekomen. Eens het model geoptimaliseerd is, kan het gebruikt worden om voorspellingen te maken van de bedieningstijd. Tot slot wordt een vergelijking gemaakt tussen de gemiddelde absolute percentage fout van het neurale netwerkmodel en van twee regressiemodellen. De gemiddelde absolute percentage fout was beduidend lager bij het neurale netwerkmodel (tot 29,2% lager). Dit wijst erop dat de voorspellingskracht van een neurale netwerkmodel aanzienlijk beter is dan deze van de regressiemodellen.

Zhu et al. (1999) gingen nog een stapje verder: ze ontwierpen een artificieel neurale netwerk-model om de wachttijden in een sluisencomplex te analyseren. Ze verdelen hiervoor het netwerk in vijf submodellen waarvan vier de variantie van de tijdsintervallen tussen opeenvolgende schepen schatten (bij consolidatiepunten, bij divergentiepunten, bij sluisuitgangen en bij elk ander punt vanaf een zeker startpunt (vb. sluisingang, haven)) en het vijfde de wachttijd aan een sluis schat. De submodellen worden eerst afzonderlijk geoptimaliseerd en aan elkaar gelinkt in een 'geïntegreerd netwerk analyse-model'. Ze maakten eveneens een simulatiemodel van hetzelfde sluisencomplex om de resultaten te vergelijken. Het verschil tussen de gemiddelde dagelijkse wachttijd in het waterwegstelsel van het geïntegreerde neurale netwerkmodel en het simulatiemodel was slechts 6,4%, terwijl de tijdswinst dat het neurale netwerk model met zich meebracht aanzienlijk was (ongeveer 750 keer sneller dan simulatie).

De voordelen van neurale netwerk-model zijn de snelheid, de mogelijkheid om een realistische netwerk configuratie aan te nemen, de flexibiliteit in het omgaan met algemene aankomst- en bedieningstijd distributie en de betrouwbaarheid van de resultaten.

HOOFDSTUK 3: PRAKTIJKONDERZOEK

3.1 Inleiding praktijkonderzoek

In het praktijkonderzoek wordt een simulatiemodel in het computerprogramma Arena ontwikkeld van de binnenvaarttrafiek aan de sluis in Diepenbeek op het Albertkanaal. In de eerste sectie wordt een beschrijving van de data gegeven. Er wordt nagegaan of het aankomstenproces in het simulatiemodel benaderd kan worden met een kansverdeling. Eveneens wordt onderzocht of de afmetingen van de schepen een kansverdeling volgen. In paragraaf 3.3 wordt meer uitleg gegeven over een 'discrete event simulatiemodel'. In paragraaf 3.4 wordt het simulatiemodel beschreven. Eerst komen de assumpties aan bod en daarna wordt een toelichting gegeven bij de variabelen en attributen die gebruikt werden. De opbouw van het model wordt tot in detail weergegeven. De relevante prestatie maatstaven en de replicatieparameters worden eveneens kort besproken. In de volgende sectie, paragraaf 3.5 komen de resultaten van het simulatiemodel aan bod. In paragraaf 3.6 wordt onderzocht welke impact de verandering van bepaalde inputfactoren heeft op wachttijden in het model aan de hand van een sensitiviteitsanalyse. Zo wordt onderzocht of de wachttijden significant veranderen als een bepaalde assumptie van het model verandert. De impact van een andere prioriteitsregel en een andere sluisbedieningstijd wordt in deze sectie eveneens onderzocht. De beperkingen van het simulatiemodel worden besproken in paragraaf 3.7. In de laatste paragraaf worden tot slot de mogelijkheden voor verder onderzoek naar de wachttijden aan de sluizen aan het Albertkanaal besproken.

3.2 Beschrijving van de data

3.2.1 Algemene gegevens

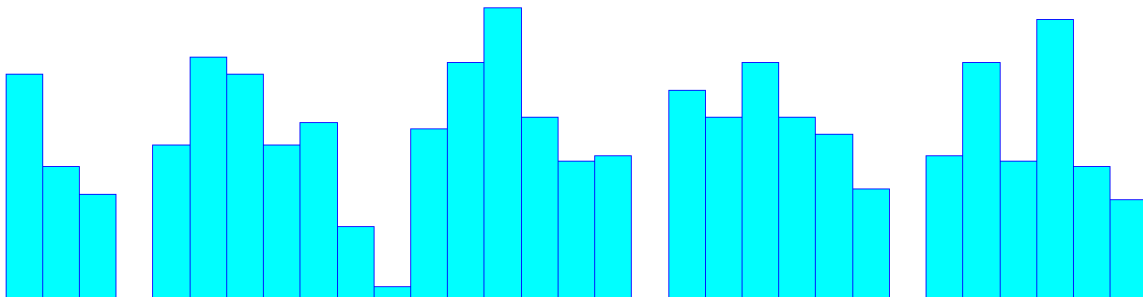
Er wordt gebruik gemaakt van data over de aankomsttijden en de lengte- en breedteafmetingen van de schepen die de sluis passeerden in maart 2007. De data worden per vaarrichting (stroomopwaarts/ stroomafwaarts) gerangschikt. Deze data zijn afkomstig van De Scheepvaart NV, de beheerder van het Albertkanaal. De sluis in Diepenbeek bestaat uit drie

kamers; een duwvaartsluis (24m x 200m) en twee gewone sassen (16m x 136 m) (De Scheepvaart NV, z.d.).

3.2.2 Aankomstenproces

Het aankomstenproces aan de sluis in Diepenbeek wordt gekenmerkt door 'groepjes van schepen' waarvan de schepen zich kort na elkaar aanmelden. Een verklaring hiervoor is de korte afstand tussen de sluis in Diepenbeek en de aangrenzende sluizen (in Hasselt en Genk) op het Albertkanaal. Door de korte afstand zullen de schepen die samen versast werden in Hasselt of in Genk, ongeveer op hetzelfde moment aankomen aan de sluis in Diepenbeek. Er bestaat bijgevolg een afhankelijkheid tussen de sluis in Diepenbeek en de sluizen in Genk en Hasselt. Hierdoor wordt verwacht dat de aankomsttijden aan de sluis in Diepenbeek niet omschreven kunnen worden met een kansverdeling. In onderstaande alinea's zal deze stelling onderzocht worden met behulp van het programma 'input analyser', een tool van het softwareprogramma Arena van Rockwell Software. Daarna wordt in dit programma onderzocht of een statistische verdeling bestaat om de aankomsttijden van de 'groepjes van schepen' te schatten alsook om de aankomsttijden van de schepen binnen de groepjes te schatten.

In figuur 8 wordt het histogram van de aankomsttijden van de schepen die stroomopwaarts varen weergegeven. De horizontale as is ingedeeld in 31 intervallen. Deze intervallen stellen elk een dag voor in maart, beginnend met donderdag 1 maart 2007. Op de verticale as staat het aantal schepen dat die dag aan de sluis is aangekomen. We kunnen in het histogram een weekpatroon onderscheiden. In het midden van de week (woensdag en donderdag) is het meestal het drukste. Op zaterdag is het beduidend minder druk aan de sluis dan op weekdagen. We merken in het histogram op dat op de tweede zondag aankomsten zichtbaar zijn. Gezien de sluis gesloten is op zondag wordt verondersteld dat een fout gebeurd is bij de dataverzameling. De data met betrekking tot de aankomsten op zondag werden daarom uit de dataset verwijderd. In tabel 2 staat een samenvatting van de aankomstendata van de schepen die stroomopwaarts varen. We kunnen hier aflezen dat in totaal 867 schepen stroomopwaarts de sluis passeerden in maart 2007.

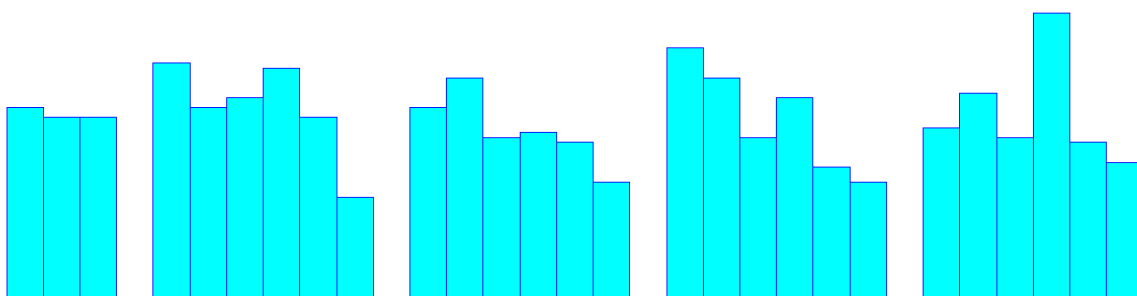


Figuur 8: Histogram aankomsten stroomopwaarts

Tabel 2: Samenvatting gegevens aankomsten stroomopwaarts

<i>Data Summary</i>	<i>Histogram Summary</i>
Number of Data Points = 867	Histogram Range = 0 to 742
Min Data Value = 0.622	Number of Intervals = 31
Max Data Value = 741	

In figuur 9 wordt het histogram weergegeven van de aankomsttijden van de schepen die stroomafwaarts varen. Een gelijkaardig weekpatroon als bij de schepen die stroomopwaarts varen kan hier worden teruggevonden. In het midden van de week is het meestal het drukste en op zaterdag is het meestal beduidend minder druk dan op de weekdays. In tabel 3 wordt de samenvatting van de aankomstendata van de schepen die stroomafwaarts varen weergegeven. We kunnen hier aflezen dat in totaal 1002 schepen stroomafwaarts de sluis passeerden in maart 2007.

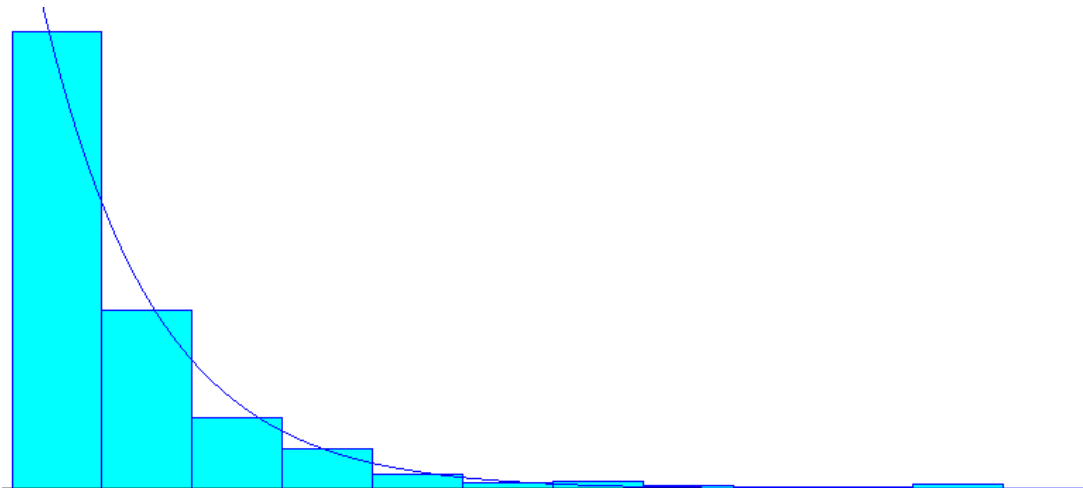


Figuur 9: Histogram aankomsten stroomafwaarts

Tabel 3: Samenvatting gegevens aankomsten stroomafwaarts

<i>Data Summary</i>		Histogram Summary	
Number of Data Points	= 1002	Histogram Range	= 1 to 741
Min Data Value	= 1.42	Number of Intervals	= 31
Max Data Value	= 741		

In de volgende stap wordt getest of de tussenaankomsttijden omschreven kunnen worden met een kansverdeling. De tussenaankomsttijd is de tijd tussen twee opeenvolgende aankomsten. Enkel de aankomstendata van de weekdays worden gebruikt omdat uit figuren 8 en 9 blijkt dat aanzienlijk minder schepen de sluis passeerden op zaterdag dan op weekdays. In figuur 10 staat het histogram van de tussenaankomsttijden van de schepen die stroomopwaarts varen. Op de horizontale as staan de tussenaankomsttijden. Deze worden onderverdeeld in zes tijdsintervallen. Op de verticale as staat het aantal keer dat een schip binnen dat tijdsinterval gearriveerd is aan de sluis na het voorgaande schip. Via 'input analyser' wordt getest welke kansverdeling de tussenaankomsttijden het best kan benaderen. Een exponentiële verdeling blijkt het beste overeen te komen met de gegevens. Dat een exponentiële verdeling wordt voorgesteld is niet verrassend gezien deze verdeling zeer vaak gebruikt wordt om tussenaankomsttijden te benaderen. In enkele modellen die beschreven werden in de literatuurstudie (cfr. paragraaf 2.4) werd de exponentiële verdeling eveneens aangehaald om de tussenaankomsttijden te omschrijven. De verdeling wordt voorgesteld met een blauwe lijn op het histogram. In tabel 4 wordt de samenvatting van de data, de uitdrukking voor de exponentiële verdeling en de resultaten van de Chi kwadraat test weergegeven. Uit de Chi kwadraat test blijkt dat de fit niet significant is (p -waarde < 0.005). Dit betekent dat de nulhypothese dat er geen verschil is tussen de geobserveerde tussenaankomsttijden en de exponentiële verdeling verworpen wordt op het 1% significantieniveau. Deze verdeling is dus geen goede benadering voor de tussenaankomsttijden van de schepen die stroomopwaarts varen.



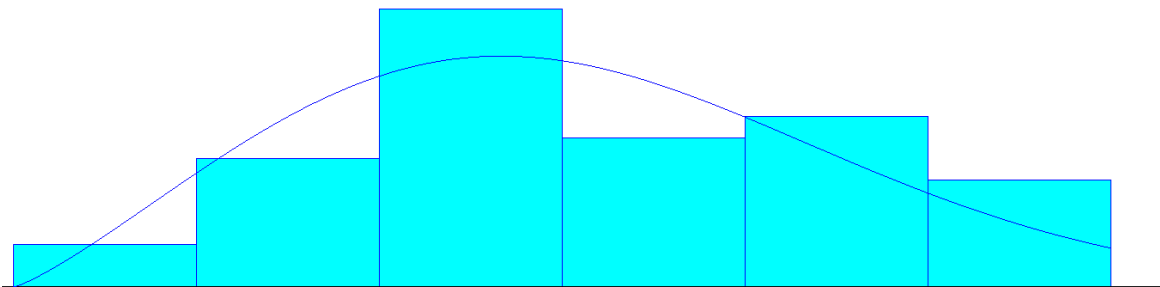
Figuur 10: Histogram tussenaankomsttijden stroomopwaarts

Tabel 4: Samenvatting gegevens, kansverdeling en Chi kwadraat test tussenaankomsttijden stroomopwaarts

<i>Data Summary</i>		<i>Chi Square Test</i>	
Number of Data Points	= 697	Number of intervals	= 6
Min Data Value	= 0	Degrees of freedom	= 4
Max Data Value	= 10.6	Test Statistic	= 17.2
		Corresponding p-value < 0.005	
<i>Distribution Summary</i>			
Distribution:	Exponential		
Expression:	-0.001 + EXPO(0.688)		
Square Error:	0.001681		

Dezelfde procedure wordt uitgevoerd op de tussenaankomsttijden van de schepen die stroomafwaarts varen. Het histogram en de tabel met de samenvatting van de gegevens, de gefitte kansverdeling en de uitkomst van de Chi kwadraat test kunnen worden teruggevonden in bijlage (bijlage 1 en 2). Opnieuw wordt een exponentiële verdeling gebruikt om de data te omschrijven. De verdeling vertoont geen significante fit met de aankomstdata (Chi kwadraat test: p-waarde < 0.005); deze verdeling kan dus niet gebruikt worden om de tussenaankomsttijden stroomafwaarts te benaderen.

Daarnaast wordt onderzocht of een kansverdeling kan worden gevonden voor de aankomsttijden indien slechts één weekdag in beschouwing genomen wordt. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de gegevens van donderdag 1 maart 2007. In figuur 11 wordt het histogram van de aankomsttijden stroomopwaarts op 1 maart 2007 weergegeven. De horizontale as is opgedeeld in 6 intervallen. Elk interval stelt vier uren voor. Het eerste blokje stelt dus het aantal aankomsten voor tussen 0 u. en 4 u., het tweede blokje tussen 4 u. en 8 u. enzovoorts. Door de 'input analyser' wordt een Weibull verdeling voorgesteld. De verdeling wordt opnieuw voorgesteld met een blauwe lijn op het histogram. In tabel 4 wordt de samenvatting van de data, de uitdrukking voor de Weibull verdeling en de resultaten van de Chi kwadraat test weergegeven. Uit de Chi kwadraat test blijkt dat de fit niet significant is op het 5% significantieniveau (p -waarde = 0,0485). Dit betekent dat de nulhypothese dat er geen verschil is tussen de geobserveerde tussenaankomsttijden en de exponentiële verdeling verworpen wordt op het 5% significantieniveau, maar niet op het 1% significantieniveau. Deze fit is dus al beter dan bij de vorige analyses, maar nog altijd niet overtuigend. Daarenboven is deze verdeling slechts gebaseerd op de aankomstendata van één dag. Uit het histogram in figuur 8 blijkt dat er veel verschillen zijn in aankomsten op de verschillende dagen. De Weibull verdeling die werd voorgesteld op basis van de aankomstendata op 1 maart (WEIB(14, 2.22)), wordt daarom eveneens gefit in de 'input analyser' op de aankomstendata van vrijdag 2 maart 2007. In bijlage kan het histogram en de samenvatting van de data, de kansverdeling en de resultaten van de Chi kwadraat test hiervan teruggevonden worden (bijlagen 3 en 4). Uit de Chi kwadraat test (p -waarde < 0,005) blijkt dat deze verdeling geen significante fit geeft voor de aankomstendata van 2 maart 2007. Er is daarenboven geen andere verdeling die een significante fit vertoont met de aankomstendata van 2 maart 2007. We hebben dezelfde analyse uitgevoerd op de aankomsttijden van de schepen die stroomafwaarts varen op 1 maart 2007. Ook hier werd echter geen kansverdeling gevonden die de aankomsten goed kan beschrijven. We kunnen besluiten dat voor beide vaarrichtingen geen verdeling kan gevonden worden die de aankomsttijden van een weekdag in maart 2007 op een adequate manier omschrijft.



Figuur 11: Histogram aankomsten stroomopwaarts 1 maart 2007

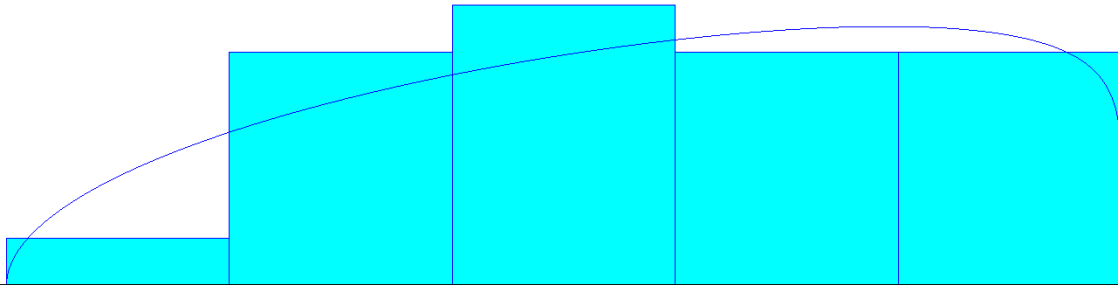
Tabel 5: Samenvatting gegevens, kansverdeling en Chi kwadraat test aankomsttijden stroomopwaarts 1 maart 2007

<i>Data Summary</i>		<i>Chi Square Test</i>	
Number of Data Points	= 41	Number of intervals	= 4
Min Data Value	= 0.622	Degrees of freedom	= 1
Max Data Value	= 23.2	Test Statistic	= 3.91
		Corresponding p-value = 0.0485	
<i>Distribution Summary</i>			
Distribution:	Weibull		
Expression:	WEIB(14, 2.22)		
Square Error:	0.013705		

In een volgende stap wordt onderzocht of de aankomsttijden van de ‘groepjes van schepen’ kunnen benaderd worden met een kansverdeling. Eerst worden de aankomsttijden van de groepjes op donderdag 1 maart 2007 onderzocht. De aankomsttijd van het eerste schip van de groep wordt gebruikt in de analyse.

In de aankomstendata van de schepen die stroomopwaarts voeren op 1 maart 2007 kunnen 22 groepjes onderscheiden worden. In figuur 12 wordt het histogram van de aankomsten van de groepjes stroomopwaarts weergegeven. Het programma ‘input analyser’ stelt een bèta verdeling voor. Deze verdeling is opnieuw getekend met een blauwe lijn in het histogram. In tabel 6 wordt de samenvatting van de data, de uitdrukking voor de bèta verdeling en de resultaten van de Chi kwadraat test weergegeven. De Chi kwadraat test wijst uit dat er geen

significante fit is tussen de aankomstendata van de groepjes en de voorgestelde bèta verdeling (p-waarde < 0.005).



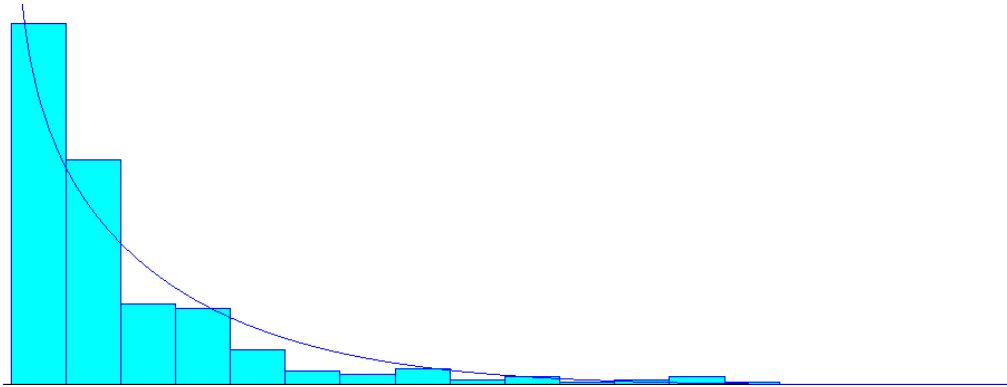
Figuur 12: Histogram aankomsten groepjes stroomopwaarts 1 maart 2007

Tabel 6: Samenvatting gegevens, kansverdeling en Chi kwadraat test aankomsttijden groepjes stroomopwaarts op 1 maart 2007

<i>Data Summary</i>		<i>Chi Square Test</i>	
Number of Data Points	= 22	Number of intervals	= 3
Min Data Value	= 0.622	Degrees of freedom	= 0
Max Data Value	= 23.2	Test Statistic	= 0.0446
		Corresponding p-value < 0.005	
<i>Distribution Summary</i>			
Distribution:	Beta		
Expression:	24 * BETA(1.52, 1.14)		
Square Error:	0.008072		

Gezien we geen verdeling vonden op basis van de aankomstdata van de groepjes stroomopwaarts van één weekdag, worden nu de tussenaankomsttijden van de groepjes stroomopwaarts van alle weekdays van maart 2007 onderzocht. De aankomstendataset is nu te groot om de groepjes één voor één te onderscheiden. Het grootste tijdsinterval tussen twee opeenvolgende schepen in een groepje was een half uur in de aankomstendata van 1 maart 2007. Daarom wordt voor het bepalen van de groepjes aangenomen dat indien de aankomst van een schip minder dan een half uur na de aankomst van het vorige schip in dezelfde vaarrichting is, we kunnen spreken van een groep. In figuur 13 wordt het histogram weergegeven van de tussenaankomsten van de 'groepjes van schepen' die stroomopwaarts

varen. Het programma 'input analyser' stelt een Weibull verdeling voor. In tabel 7 wordt de samenvatting van de data, de uitdrukking voor de Weibull verdeling en de resultaten van de Chi kwadraat test weergegeven. De Chi kwadraat test wijst uit dat er geen significante fit is tussen de aankomstendata van de groepjes en de voorgestelde Weibull verdeling (p-waarde = 0.0297).



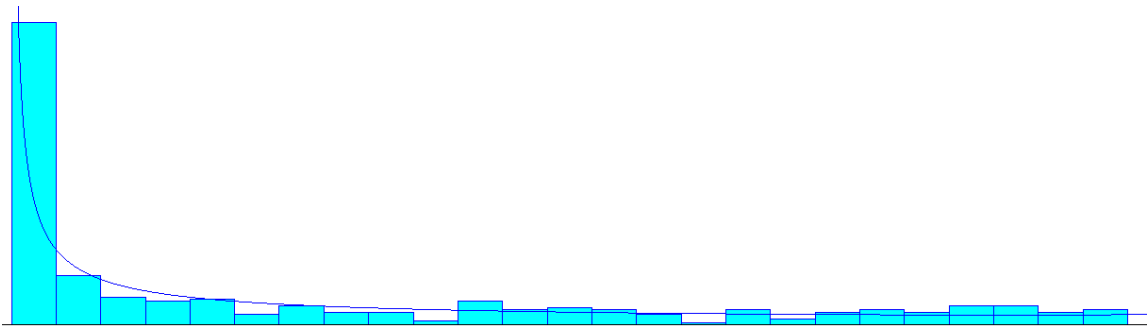
Figuur 13: Histogram tussenaankomsttijden groepjes stroomopwaarts

Tabel 7: Samenvatting gegevens, kansverdeling en Chi kwadraat test tussenaankomsttijden groepjes stroomopwaarts

<i>Data Summary</i>		<i>Chi Square Test</i>	
Number of Data Points	= 316	Number of intervals	= 8
Min Data Value	= 0.5	Degrees of freedom	= 5
Max Data Value	= 10.6	Test Statistic	= 12.5
		Corresponding p-value	= 0.0297
<i>Distribution Summary</i>			
Distribution:	Weibull		
Expression:	0.5 + WEIB(0.82, 0.881)		
Square Error:	0.004498		

Dezelfde analyse werd uitgevoerd op de groepjes van schepen die stroomafwaarts varen en er werd eveneens geen geschikte kansverdeling gevonden om de aankomsten te benaderen. We kunnen daarom besluiten dat de aankomsttijden aan de sluis van Diepenbeek van de groepjes schepen op basis van de data uit maart 2007 niet benaderd kunnen worden met een kansverdeling.

In een laatste stap wordt onderzocht of de spreiding van de schepen binnen de groepjes een statistische verdeling volgt. Hiervoor wordt opnieuw een groepje gedefinieerd als twee of meer schepen die in dezelfde richting varen en op minder dan dertig minuten van elkaar aankomen bij de sluis. De analyse wordt uitgevoerd op de weekdays in maart 2007. Het histogram van de spreiding van de schepen binnen de groepjes die stroomopwaarts varen, wordt in figuur 14 weergegeven. In tabel 8 staat de samenvatting van de gegevens, de kansverdeling en de Chi kwadraat test. Door de 'input analyser' wordt een bèta verdeling voorgesteld. De Chi kwadraat test heeft een p-waarde kleiner dan 0,005. Dit betekent dat de nulhypothese dat de voorgestelde bèta verdeling en de geobserveerde data gelijk zijn aan elkaar, verworpen kan worden op het 5% significantieniveau.



Figuur 14: Histogram spreiding binnen groepjes stroomopwaarts

Tabel 8: Samenvatting gegevens, kansverdeling en Chi kwadraat test spreiding binnen groepjes stroomopwaarts

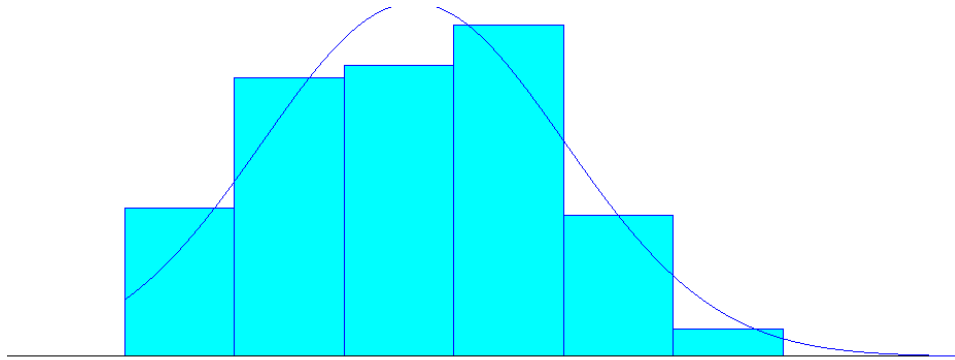
<i>Data Summary</i>		<i>Chi Square Test</i>	
Number of Data Points	= 325	Number of intervals	= 15
Min Data Value	= 0.000694	Degrees of freedom	= 12
Max Data Value	= 0.499	Test Statistic	= 28.8
		Corresponding p-value < 0.005	
<i>Distribution Summary</i>			
Distribution:	Beta		
Expression:	1e-005 + 0.55 * BETA(0.271, 0.851)		
Square Error:	0.004347		

We merken wel op dat het histogram in figuur 14 visueel gezien een exponentiële verdeling lijkt te volgen. Een exponentiële verdeling zou ook logisch zijn gezien het aannemelijk is dat de aankomsten binnen een groepje willekeurig verlopen. In bijlage staan daarom het histogram en de Chi kwadraat test van de spreiding van de schepen die stroomopwaarts varen omschreven met een exponentiële verdeling (bijlagen 5 en 6). Gezien 'input analyser' altijd de verdeling geeft met de beste fit, is het geen verrassing dat ook de exponentiële verdeling geen significante fit vertoont met de gegevens. Voor de spreiding binnen de groepjes van schepen die stroomafwaarts varen tijdens de weekdays van maart 2007 werd eveneens geen geschikte kansverdeling gevonden.

Uit het bovenstaande kan geconcludeerd worden dat geen statistische verdeling kan gevonden worden voor het aankomstenpatroon van de schepen aan de sluis in Diepenbeek op basis van de aankomstendata van maart 2007. Dit bevestigt onze hypothese. Een mogelijke reden hiervoor is de afhankelijkheid van de sluis in Diepenbeek met de sluisen in Hasselt en Genk. In het simulatiemodel zullen daarom de geobserveerde aankomsttijden gebruikt worden.

3.2.3 Afmetingen van de schepen

Het oppervlak van de schepen worden eveneens onder de loep genomen. In figuur 15 wordt het histogram van de verdeling van de afmetingen weergegeven. De 'input analyser' stelt een normale verdeling voor om de waarden van de afmetingen te schatten. De p-waarde van de Chi kwadraat test is kleiner dan 0,005; de nulhypothese dat de normale verdeling overeenkomt met de geobserveerde afmetingen wordt dus verworpen op het 1% significantieniveau. In het simulatiemodel zullen daarom de geobserveerde data gebruikt worden voor de afmetingen van de schepen in plaats van een kansverdeling.



Figuur 15: Histogram afmetingen van de schepen

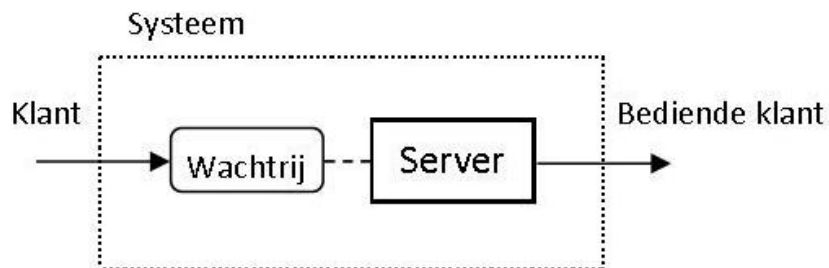
Tabel 9: Samenvatting gegevens, kansverdeling en Chi kwadraat test afmetingen schepen

<i>Data Summary</i>		<i>Chi Square Test</i>	
Number of Data Points	= 1869	Number of intervals	= 7
Min Data Value	= 47.5	Degrees of freedom	= 4
Max Data Value	= 3.1e+003	Test Statistic	= 78.7
		Corresponding p-value < 0.005	
<i>Distribution Summary</i>			
Distribution:	Normal		
Expression:	NORM(717, 350)		
Square Error:	0.005047		

3.3 Discrete event simulatiemodel

Het simulatiemodel in het computerprogramma Arena is een 'discrete event simulatiemodel'. Dit wil zeggen dat de status van het systeem enkel verandert op discrete momenten in de tijd waarop events gebeuren. Een *event* is een gebeurtenis in de tijd die de waarden van de attributen en van de variabelen kan veranderen. Het aankomen van een schip in het systeem en het aflopen van een versassing zijn voorbeelden van gebeurtenissen die voorkomen in een simulatiemodel.

In figuur 16 wordt een wachtrijmodel weergegeven. Een klant (het schip) komt het systeem (sluizencomplex) binnen en wacht in de wachtrij totdat de server of bedieningseenheid (de sluis) vrij is om hem te bedienen. Als de klant bediend is, verlaat hij het systeem. In het simulatiemodel dat in dit praktijkonderzoek ontwikkeld werd, zijn de schepen dus de 'klanten', de sluis is de server en het systeem is het sluizencomplex.



Figuur 16: Wachtrijstelsel

3.4 Ontwikkeling simulatiemodel

3.4.1 Assumpties

Er zijn twee soorten entiteiten in dit model: schepen die stroomopwaarts varen (*schepen OW*) en schepen die stroomafwaarts varen (*schepen AW*). Voor de aankomsttijden wordt gebruik gemaakt van de geobserveerde data in maart 2007. De oppervlakte van de schepen wordt eveneens toegewezen op basis van de geobserveerde data in maart 2007.

Er is slechts één sluiskamer. De grootste sluiskamer (de duwvaartsluis) met een oppervlakte van 4800 m² (24m * 200m) wordt gebruikt. De totale oppervlakte van de sluiskamer kan echter nooit volledig opgevuld worden met schepen gezien rekening moet gehouden worden met de vorm en afmetingen van de schepen en omdat de schepen niet tegen elkaar kunnen staan in de sluis. Een marge van 10% wordt daarom genomen op de totale oppervlakte, waardoor de sluiskamer een beschikbare oppervlakte heeft van 4320 m². Met dienstonderbrekingen of 'stalls' wordt geen rekening gehouden omdat dit nauwelijks voorkomt en er bijgevolg ook geen gegevens over beschikbaar zijn.

Voor de sluisbedieningstijd van de duwvaartsluis wordt een triangulaire verdeling verondersteld met modus 18 minuten, minimum 16 minuten en maximum 20 minuten. Een triangulaire verdeling werd gekozen omdat er een duidelijk afgelijnd minimum en maximum is. Het is bijvoorbeeld niet mogelijk dat de tijd om een schip te versassen een negatieve waarde aanneemt. Het omdraaien van een lege sluis neemt 18 minuten in beslag. Hierover waren geen exacte data beschikbaar, maar gezien dit de modus is van de sluisbedieningstijden lijkt het realistisch.

Bij de plaatsing van de schepen in de sluis wordt nagegaan of voldoende ruimte vrij is in de sluiskamer op basis van de oppervlakte van het schip en de resterende oppervlakte in de sluiskamer. Voor de behandeling van de wachtrijen (stroomopwaarts en stroomafwaarts) wordt een FIFO principe gehanteerd. Indien schepen aan beide kanten van de sluis te wachten staan, wordt bij voorkeur een 'exchange lockage' gedaan. Dit betekent dat indien een schip te wachten staat dat in de tegenovergestelde richting vaart dan het schip dat net de sluiskamer verlaten heeft, dat dit schip dan voorrang krijgt op de schepen die in dezelfde richting als het voorgaande schip versast willen worden.

Als een schip binnen het half uur aan de sluis zal arriveren, wordt gewacht met versassen als de sluiskamer open staat in de richting van het arriverende schip en als geen schip in de wachtrij staat dat in dezelfde richting vaart als het aankomende schip. Bovendien wordt enkel gewacht als de beschikbare oppervlakte van de sluiskamer groter is dan 47 m^2 . Deze waarde werd gekozen omdat het kleinste schip in de dataset een oppervlakte van $47,5 \text{ m}^2$ heeft. Indien de resterende oppervlakte kleiner dan deze waarde is, past geen schip nog in de sluiskamer.

3.4.2 Attributen

Attributen zijn eigenschappen van de entiteiten (schepen) waarvan de waarde kan verschillen voor elke entiteit. Er worden drie attributen gebruikt in dit model.

Aankomsttijd schip OW geeft de aankomsttijd van het schip weer dat stroomopwaarts vaart.

Aankomsttijd AW geeft de aankomsttijd van het schip weer dat stroomafwaarts vaart.

Oppervlakte Schip geeft de oppervlakte van het schip weer.

3.4.3 Variabelen

Variabelen geven informatie over een bepaalde karakteristiek van het systeem. Hieronder wordt een opsomming gegeven van de variabelen die gebruikt worden in dit model.

Volgende aankomst OW geeft de aankomsttijd bij de sluis aan van het eerstvolgende schip dat stroomopwaarts vaart.

Volgende aankomst AW geeft de aankomsttijd bij de sluis aan van het eerstvolgende schip dat stroomafwaarts vaart.

Schepen OW DS geeft het aantal schepen weer die stroomopwaarts varen en die zich momenteel in het systeem (in de wachtrij of in de sluiskamer) bevinden. Wanneer een schip dat stroomopwaarts vaart toekomt aan de sluis, vermeerderd de variabele met één, wanneer een schip stroomopwaarts het systeem verlaat vermindert de variabele met één. De initiële waarde van de variabele is nul.

Schepen AW DS geeft het aantal schepen weer die stroomafwaarts varen en die zich momenteel in het systeem (in de wachtrij of in de sluiskamer) bevinden. Wanneer een schip dat stroomafwaarts vaart toekomt aan de sluis, vermeerderd de variabele met één, wanneer een schip stroomafwaarts het systeem verlaat vermindert de variabele met één. De initiële waarde van de variabele is nul.

Resterende Opp geeft de resterende oppervlakte in de sluiskamer weer. De initiële waarde van deze variabele is 4320. Wanneer een schip geplaatst wordt in een sluiskamer, neemt deze variabele af met de oppervlakte van het schip. Wanneer de schepen versast zijn, neemt deze variabele terug zijn initiële waarde aan van 4320.

Batch Size geeft de grootte van het lot weer om te versassen. De initiële waarde van deze variabele is nul. De variabele verhoogt met één wanneer een schip de sluiskamer binnenvaart en vermindert tot nul wanneer het versassingsproces van start gaat.

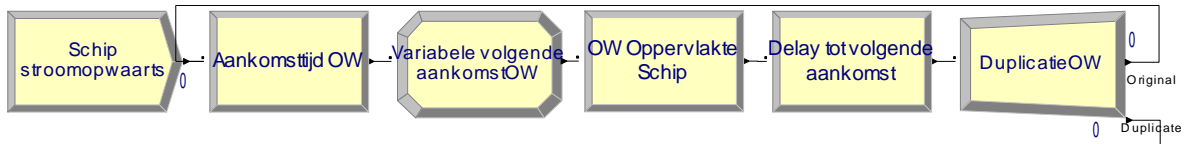
Bezig met versassen is een binaire variabele en krijgt de waarde één als de sluiskamer gesloten is in beide richtingen en de waarde nul als de sluiskamer open staat, m.a.w. als geen schepen versast worden in de sluiskamer.

Versassing stroomopwaarts is een binaire variabele en krijgt de waarde één als de sluiskamer open staat in de richting van de schepen die stroomafwaarts varen en de waarde nul als de sluiskamer open staat in de richting van de schepen die stroomopwaarts varen. Telkens na een versassing verandert deze variabele dus van waarde.

3.4.5 Opbouw simulatiemodel

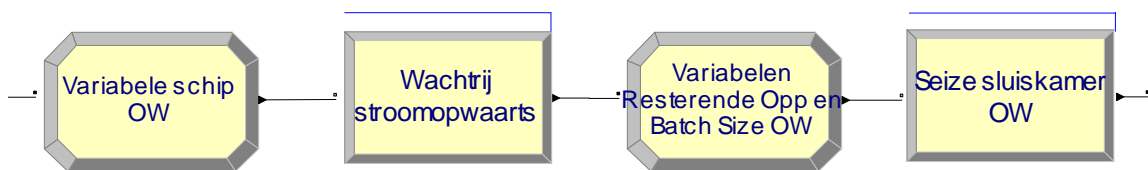
Uit paragraaf 3.3.2 blijkt dat de aankomsttijden aan de sluis niet omschreven kunnen worden met een kansverdeling. Daarom wordt geopteerd om de geobserveerde aankomsttijden in maart 2007 te gebruiken voor de generatie van de schepen. De aankomsttijden staan voor elke vaarrichting (stroomopwaarts en stroomafwaarts) in een tekstdocument (.txt) uitgedrukt in uren. In deze paragraaf wordt de opbouw van het simulatiemodel in Arena besproken. Het simulatiemodel kan worden opgedeeld in drie delen; de generatie van de schepen, het versassingsproces en het verlaten van het systeem. De visuele weergave in Arena van de generatie van de schepen die stroomopwaarts varen kan in figuur 17 worden teruggevonden. De generatie van de schepen die stroomafwaarts varen verloopt volledig analoog. Het tekstdocument met de aankomsttijden stroomopwaarts wordt in Arena in de 'read/write module' *Aankomsttijd OW* ingelezen. De variabele *Volgende aankomst OW* neemt in de volgende module de waarde aan van het tijdstip dat net werd ingelezen. In de volgende 'read/write' module *OW Oppervlakte Schip* wordt de oppervlakte van het desbetreffende schip ingelezen. Paragraaf 3.2.3 wees uit dat de afmetingen van de schepen eveneens niet benaderd konden worden met een kansverdeling. Daarom wordt gebruik gemaakt van de reële afmetingen van de schepen die aankwamen in maart 2007 aan de sluis in Diepenbeek. In de module *Delay tot volgende aankomst* wacht de entiteit totdat het tijdstip dat net werd

ingelezen overeenkomt met de simulatieklok. In module *Duplicatie OW* tot slot, wordt de entiteit gedupliceerd; één entiteit gaat naar de wachtrij voor de sluiskamer en één entiteit gaat terug naar de eerste 'read/write module' *Aankomsttijd OW* en doorloopt opnieuw de procedure die hierboven beschreven staat.



Figuur 17: Generatie schepen in Arena

Het versassingsproces in dit simulatiemodel kan worden opgedeeld in drie stappen. Opnieuw wordt enkel het versassingsproces in de vaarrichting stroomopwaarts besproken. Het proces in de vaarrichting stroomafwaarts verloopt volledig analoog. De eerste stap in het versassingsproces wordt weergegeven in figuur 18.



Figuur 18: Versassingsproces deel 1 Arena

In de module *Variabele schip OW* vermeerderd de variabele *Schepen OW DS* met één telkens als een entiteit deze module passeert. In de volgende module, *Wachtrij stroomopwaarts*, worden de entiteiten tegen gehouden totdat voldaan wordt aan volgende uitdrukking:

Bezig met versassen == 0 && ((NR(OppervlakteSluiskamer) + Oppervlakte Schip) <= 4320) && (Versassing stroomopwaarts ==0 || Schepen AW DS ==0)

Dit houdt in dat een schip dat stroomopwaarts vaart pas wordt doorgelaten naar de sluiskamer als voldaan wordt aan volgende voorwaarden:

- 1) Er mag geen versassing bezig zijn. (*Bezig met versassen == 0*)

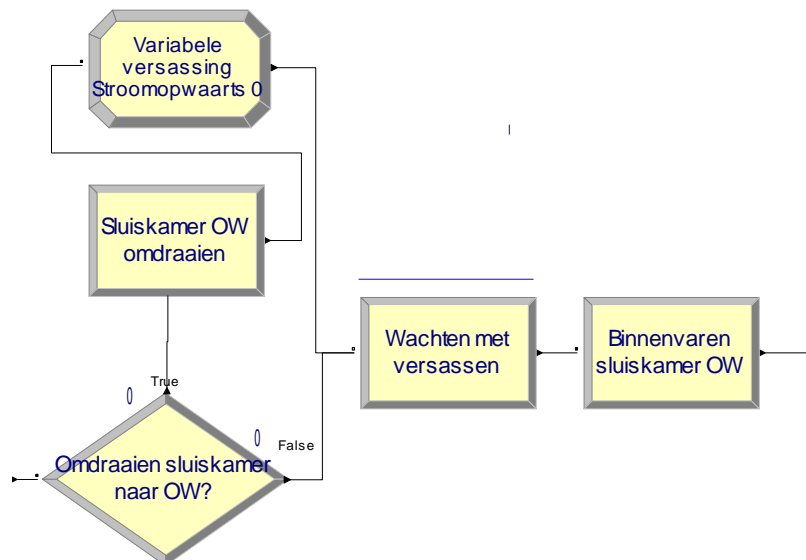
- 2) Voldoende oppervlakte in de sluiskamer moet beschikbaar zijn voor het schip.
($NR(\text{OppervlakteSluiskamer}) + \text{Oppervlakte Schip} \leq 4320$)
- 3) De sluiskamer moet open staan in de richting van de schepen die stroomopwaarts varen. Hier wordt dus voorrang gegeven aan een 'exchange lockage'. ($\text{Versassing stroomopwaarts} == 0$)

OF

Er staan geen schepen die stroomafwaarts varen in de wachtrij of in de sluiskamer.
($\text{Schepen AW DS} == 0$) De sluiskamer moet dan omdraaien.

Wanneer aan bovenstaande voorwaarden voldaan wordt, worden in de volgende module de variabelen *Resterende Opp* en *Batch Size* aangepast. *Resterende Opp* wordt verminderd met de grootte van schip dat werd doorgelaten en *Batch Size* wordt vermeerderd met één. Tot slot wordt in de module *Seize sluiskamer OW* de oppervlakte van de sluiskamer dat het schip inneemt, 'gegrepen' door het schip. Dit betekent dat de beschikbare oppervlakte van de sluiskamer vermindert met de oppervlakte van het schip.

De weergave in Arena van de tweede stap in het versassingsproces kan teruggevonden worden in figuur 19.



Figuur 19: Versassingsproces deel 2 Arena

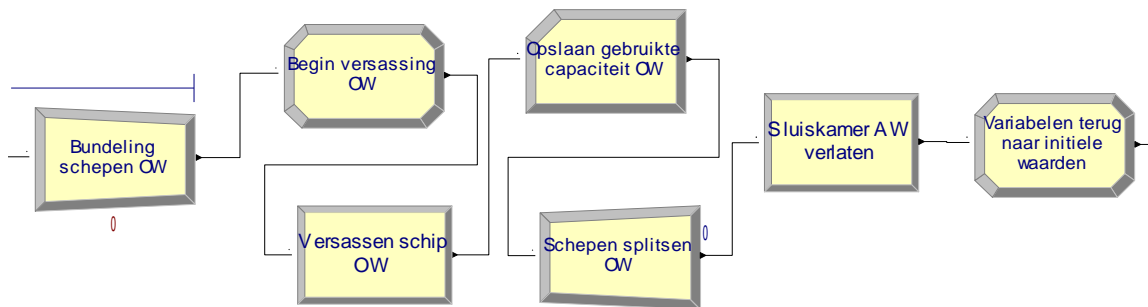
Eerst wordt onderzocht of de sluiskamer moet worden omgedraaid. Dit is nodig als de kamer open staat in de vaarrichting stroomafwaarts i.p.v. stroomopwaarts. Dit wordt getest in de module *Omdraaien sluiskamer naar OW* waarin naar de waarde van de variabele *Versassing stroomopwaarts* gekeken wordt. Indien deze variabele de waarde nul heeft, kan de entiteit doorgaan naar de module *Wachten met versassen*. Indien de variabele de waarde één heeft, staat de sluiskamer open in de verkeerde richting en moet de sluiskamer omdraaien in de module *Sluiskamer OW omdraaien*. Zoals in de assumpties al werd aangegeven, nemen we aan dat het omdraaien van een lege sluiskamer achttien minuten in beslag neemt. De variabele *Versassing stroomopwaarts* neemt dan de waarde nul aan, gezien de sluiskamer nu wel open staat in de richting van de schepen die stroomopwaarts varen. Dan kan de entiteit doorgaan naar de module *Wachten met versassen*. De entiteiten worden pas doorgelaten naar de volgende module *Binnenvaren sluiskamer OW* als aan de volgende uitdrukking wordt voldaan:

$$\text{Resterende opp} \leq 47 \text{ || } ((\text{VolgendeAankomstOW} - \text{TNOW}) \geq 0.5 \text{ || } \\ \text{NQ}(\text{Wachtrijstroomopwaarts.Queue}) \geq 1$$

Dit houdt in dat de entiteiten pas worden doorgelaten als aan één van onderstaande voorwaarden voldaan wordt:

- De resterende oppervlakte in de sluiskamer is kleiner of gelijk aan 47 m². (*Resterende Opp* <= 47)
- Het volgende schip dat stroomopwaarts vaart, arriveert pas ten vroegste over een half uur aan de sluis. ($((\text{VolgendeAankomstOW} - \text{TNOW}) \geq 0.5)$)
- Er staat al een schip dat stroomopwaarts vaart in de wachtrij dat niet meer past in de sluiskamer. ($\text{NQ}(\text{Wachtrijstroomopwaarts.Queue}) \geq 1$)

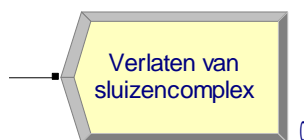
De laatste stap van het versassingsproces kan worden teruggevonden in figuur 20.



Figuur 20: Versassingsproces deel 3 Arena

In de 'batch module' *Bundeling schepen OW* worden de schepen die samen versast zullen worden gebundeld. In de volgende module wordt aan de variabele *Bezig met versassen* de waarde één gegeven. De module *Versassen schip OW* wordt gebruikt om de sluisbedieningstijd te simuleren. Zoals in de assumpties al werd vermeld, nemen we aan dat de sluisbedieningstijd van de duwvaartsluis een triangulaire verdeling volgt met modus 18 minuten, minimum 16 minuten en maximum 20 minuten. In de Record module *Opslaan gebruikte capaciteit OW* wordt de oppervlakte bijgehouden die ingenomen wordt door de schepen in de sluiskamer. In de 'Separate module' *Schepen splitsen terug op OW* worden de schepen die tijdelijk gebundeld werden in de module *Bundeling schepen OW* terug gesplitst in de originele entiteiten. De schepen verlaten daarna de sluiskamer, waardoor de oppervlakte van de sluiskamer opnieuw volledig beschikbaar is. In de laatste module van het versassingsproces veranderen de variabelen *Bezig met versassen*, *Versassing stroomopwaarts* en *Resterende opp* terug naar hun waarden voordat het versassingsproces begon. De variabele *Schepen OW DS*, wordt in deze module verminderd met het aantal schepen dat versast werd.

Wanneer het versassingsproces doorlopen is, verlaat de entiteit in de module *Verlaten van sluisencomplex* het systeem. In figuur 21 wordt deze module weergegeven.



Figuur 21: Verlaten van systeem in Arena

3.4.6 Prestatiemaatstaven

In de wetenschappelijke literatuur komt de gemiddelde wachttijd naar voren als belangrijkste prestatemaatstaf bij de beoordeling van de sluiswerking. Daarnaast is ook de maximale wachttijd en de systeemtijd belangrijk. Er dient wel rekening gehouden te worden met het feit dat slechts één sluiskamer gemodelleerd wordt, terwijl in werkelijkheid het sluisencomplex in Diepenbeek bestaat uit één grote sluiskamer en twee kleinere sluiskamers. Gezien de kleinere sluiskamers niet gemodelleerd worden, is het waarschijnlijk dat de wachttijden langer zullen zijn in dit model dan in werkelijkheid.

Tot slot zal ook het gemiddeld aantal versassingen en de benuttingsgraad van de sluiskamer per versassing onderzocht worden. Idealiter is de benuttingsgraad zo groot mogelijk, zodat veel schepen samen versast worden en dus zo weinig mogelijk versassingen nodig zijn. Elke versassing kost immers energie, dus indien de schepen gebundeld worden bij een versassing, betekent dit een besparing van energie.

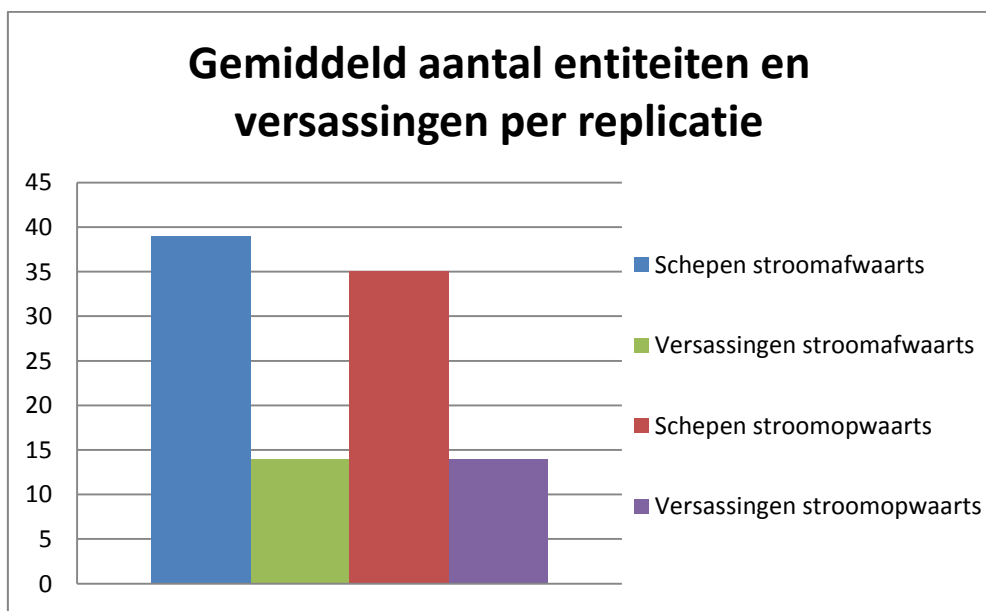
3.4.7 Replicatieparameters

Hoewel de sluis tijdens wekdagen 24u op 24u open is, is het toch een *terminating* of *eindige simulatie*, gezien 's nachts zeer weinig binnenvaartverkeer is en dus duidelijk afgelijnde tijdsgrenzen gespecificeerd kunnen worden waarop het sluisencomplex actief is. Bijgevolg werd gekozen om een periode van één dag te simuleren. Aangezien de sluis op zondag gesloten is en uit de analyse van de aankomsttijden bleek dat op zaterdag aanzienlijk minder binnenvaartverkeer was dan op de wekdagen, wordt gekozen om enkel de wekdagen te simuleren. Twintig replicaties worden gemaakt, telkens met de aankomstdata van een andere weekdag uit maart 2007.

3.5 Resultaten simulatiemodel

3.5.1 Algemene resultaten

Gemiddeld verlaten 74 entiteiten per replicatie het systeem. Hiervan zijn 39 schepen die stroomafwaarts varen en 35 schepen die stroomopwaarts varen. Gemiddeld vinden 28 versassingen plaats per dag, waarvan gemiddeld 14 versassingen stroomafwaarts en 14 versassingen stroomopwaarts. Per versassing stroomafwaarts zijn dus gemiddeld 2,8 schepen in de sluiskamer aanwezig en per versassing stroomopwaarts zijn gemiddeld 2,5 schepen aanwezig in de sluiskamer. In figuur 22 worden het gemiddeld aantal entiteiten en versassingen per replicatie grafisch weergegeven.



Figuur 22: Gemiddeld aantal entiteiten en versassingen per replicatie per vaarrichting

3.5.2 Benuttingsgraad

Bij de schepen die stroomafwaarts varen wordt per versassing gemiddeld 1969 m² van de sluiskamer ingenomen. Dit betekent dat gemiddeld gezien ongeveer 46% van de oppervlakte van de sluiskamer wordt ingenomen bij een versassing. Bij de schepen die stroomopwaarts varen, ligt dit cijfer iets lager, met een gemiddelde benuttingsgraad van de sluiskamer bij een

versassing van 42%. In tabel 10 worden de gegevens in verband met de benuttingsgraad samengevat.

Tabel 10: Simulatieoutput benuttingsgraad per versassing

	Gemiddelde	Benuttings- graad	Halve breedte BI	Minimum	Maximum
Gebruikte oppervlakte sluiskamer per versassing AW	1969,42	0,46	140,01	80,98	4315,25
Gebruikte oppervlakte sluiskamer per versassing OW	1810,83	0,42	118,16	123,2	4195,18

Een betrouwbaarheidsinterval kan worden opgesteld voor de gemiddelde gebruikte oppervlakte van de sluiskamer per versassing in beide vaarrichtingen. De voorwaarden hiervoor zijn dat de observaties over de verschillende replicaties onafhankelijk en identiek gedistribueerd zijn en normaal verdeeld zijn. We gaan ervan uit dat voldaan wordt aan deze assumpties.

Het betrouwbaarheidsinterval van de gebruikte oppervlakte van de sluiskamer per versassing stroomafwaarts wordt hieronder weergegeven.

$$95\% \text{ BI}_{\text{Gebruikte oppervlakte sluiskamer per versassing AW}} = [1969,42 \pm 140,01] = [1829,41; 2109,43]$$

Dit betekent dat er 95% kans is dat de gebruikte oppervlakte van de sluiskamer per versassing van een replicatie tussen 1829,41 m² en 2109,43 m² ligt. Dit komt overeen met een benuttingsgraad per versassing tussen 42% en 49%.

Het betrouwbaarheidsinterval van de gebruikte oppervlakte van de sluiskamer per versassing stroomopwaarts wordt hieronder weergegeven .

$$95\% \text{ BI}_{\text{Gebruikte oppervlakte sluiskamer per versassing OW}} = [1810,83 \pm 118,16] = [1692,67; 1928,99]$$

Dit betekent dat er 95% kans is dat de gebruikte oppervlakte van de sluiskamer per versassing van een replicatie tussen 1692,67 m² en 1928,99 m² ligt. Dit komt overeen met een benuttingsgraad per versassing tussen 39% en 45%.

3.5.3 Systeemtijd

De samenvatting van de resultaten in verband met de systeemtijd kan teruggevonden worden in tabel 11. Schepen die stroomafwaarts varen zijn gemiddeld 40 minuten in het systeem, met een gemiddelde wachttijd van 22 minuten en een gemiddelde transfertijd van 18 minuten. De transfertijd is de tijd nodig voor de versassing zelf. Schepen die stroomopwaarts varen hebben een gemiddelde systeemtijd van 37 minuten, waarvan een gemiddelde wachttijd van 19 minuten en een gemiddelde transfertijd van 18 minuten. De minima en maxima van de transfertijden liggen, zoals verwacht, tussen 16 en 20 minuten met een gemiddelde rond 18 minuten. De maximale wachttijden voor de schepen die stroomafwaarts varen en de schepen die stroomopwaarts varen zijn respectievelijk 107 minuten en 116 minuten. Dit lijkt zeer hoog en wordt van naderbij onderzocht. De maximale wachttijd wordt in tabel 12 weergegeven voor elke replicatie. Hieruit is duidelijk dat de maximale wachttijd sterk verschilt tussen de verschillende replicaties. Gemiddeld is de maximale wachttijd 74 minuten voor de schepen die stroomafwaarts varen en 68 minuten voor de schepen die stroomopwaarts varen. In vier replicaties moet een schip dat stroomafwaarts vaart langer wachten dan 100 minuten, voor de schepen die stroomopwaarts varen gebeurt dit slechts in twee replicaties.

Tabel 11: Simulatieoutput wachttijd, transfertijd en systeemtijd

		Gemiddelde	Halve breedte BI	Minimum	Maximum
Wachttijd	Schepen AW	21,85	2,4	0,02	106,86
	Schepen OW	19,06	3	0,02	116,45
	Alle schepen	20,45		0,02	116,45
Transfer-tijd	Schepen AW	18,1	0	16,16	19,93
	Schepen OW	18,05	0	16,05	19,85
	Alle schepen	18,08		16,05	19,93
Totale tijd	Schepen AW	39,95	2,4	16,17	125,24
	Schepen OW	37,11	3	16,33	133,7
	Alle schepen	38,53		16,17	133,7

Tabel 12: Maximale wachttijden per replicatie

	Maximale wachttijd AW	Maximale wachttijd OW
Replicatie 1	51,39	75,12
Replicatie 2	58,27	35,72
Replicatie 3	103,68	79,26
Replicatie 4	53,98	63,06
Replicatie 5	101,7	116,4
Replicatie 6	19,87	18,82
Replicatie 7	60,3	63,96
Replicatie 8	73,62	68,64
Replicatie 9	91,86	54,1
Replicatie 10	87	63,6
Replicatie 11	50,44	47,72
Replicatie 12	69,06	113,82
Replicatie 13	72,54	51,44
Replicatie 14	81,24	58,31
Replicatie 15	78,84	88,02
Replicatie 16	103,26	55,27
Replicatie 17	71,76	84,18
Replicatie 18	106,8	89,22
Replicatie 19	64,26	61,14
Replicatie 20	74,22	74,22
Gemiddelde	73,7	68,1

We gaan ervan uit dat de gemiddelde wachttijden per vaarrichting over de replicaties onafhankelijk en identiek gedistribueerd zijn en dat ze een normale verdeling volgen. Bijgevolg kan een betrouwbaarheidsinterval worden opgesteld voor de gemiddelde wachttijden van de schepen in beide vaarrichtingen.

Het betrouwbaarheidsinterval van de gemiddelde wachttijd van de schepen die stroomafwaarts varen wordt hieronder weergegeven.

$$95\% \text{ BI}_{\text{wachttijden schepen AW}} = [21,85 \pm 2,40] = [19,45; 24,25]$$

Dit betekent dat er 95% kans is dat de gemiddelde wachttijd van een replicatie tussen 19,45 minuten en 24,25 minuten ligt.

Het betrouwbaarheidsinterval van de gemiddelde wachttijd van de schepen die stroomopwaarts varen wordt eveneens berekend.

$$95\% \text{ BI}_{\text{wachttijden schepen OW}} = [19,06 \pm 3] = [16,06; 22,06]$$

Dit betekent dat er 95% kans is dat de gemiddelde wachttijd van een replicatie tussen 16,06 minuten en 22,06 minuten ligt.

3.5.4 Conclusies

Gemiddeld gezien werden per dag 39 schepen stroomafwaarts versast en 35 schepen stroomopwaarts. Ondanks dit relatief lage aantal passerende schepen per vaarrichting, werden toch veel schepen gebundeld gezien gemiddeld slechts 28 versassingen plaatsvonden. De reden hiervoor ligt bij het feit dat de schepen vaak in groepjes aankomen bij de sluis, waardoor deze samen versast kunnen worden. De benuttingsgraad van de sluiskamer was hierdoor acceptabel. Bij de versassingen stroomafwaarts was de benuttingsgraad 46% en bij de versassingen stroomopwaarts 42%.

De gemiddelde systeemtijd van de schepen in het sluisencomplex is circa 38 minuten en de gemiddelde wachttijd is circa 20 minuten. Dit lijkt op het eerste zicht relatief hoog voor een vervoersmiddel dat een alternatief zou moeten zijn voor de files op de weg. Daarnaast is de maximale wachttijd van 116 minuten echt zeer hoog. Uit de analyse blijkt echter wel dat deze extreem hoge maximale wachttijd maar in enkele replicaties voorkomt en dat de gemiddelde maximale wachttijd slechts 70 minuten bedraagt over alle replicaties. Daarenboven moet rekening gehouden worden met het feit dat slechts één sluiskamer gemodelleerd wordt, terwijl in werkelijkheid nog twee kleinere sassen aanwezig zijn in het sluisencomplex van Diepenbeek. De gemiddelde wachttijd, de systeemtijd en de maximale wachttijden zullen dus lager liggen in realiteit.

3.6 Sensitiviteitsanalyse

In deze paragraaf wordt de invloed van een wijziging van enkele inputparameters op de prestatieparameters onderzocht. Deze paragraaf kan opgedeeld worden in twee delen. In de

eerste sectie zal de sensitiviteit van de parameter 'Aantal minuten wachten met versassen' onderzocht worden. De waarde voor deze parameter is slechts een schatting en het is dus belangrijk om te weten welke invloed een eventuele afwijking van de werkelijke waarde op de prestatie maatstaven uitoefent. In secties 3.6.2 en 3.6.3 worden oplossingen onderzocht die in de wetenschappelijke literatuur aangehaald worden om de wachttijden aan sluisen te verminderen (cfr. paragraaf 2.3). Eerst wordt onderzocht welke invloed het gebruik van een andere prioriteitsregel heeft op de prestatie maatstaven. Daarnaast wordt de invloed van een reductie van de bedieningstijden onderzocht.

3.6.1 Sensitiviteit parameter 'Aantal minuten wachten met versassen'

In deze sectie wordt de sensitiviteit van de parameter 'Aantal minuten wachten met versassen' onderzocht. In de assumpties van het simulatiemodel (cfr. paragraaf 3.4.1) werd gesteld dat gewacht wordt met versassen op een schip dat nog zal arriveren aan de sluis indien aan een aantal voorwaarden wordt voldaan. Deze voorwaarden werden opgesteld aan de hand van logisch redeneren. De waarde voor de parameter die bepaalt hoeveel minuten gewacht wordt op een arriverend schip, werd dus geschat. In deze sectie wordt onderzocht hoe robuust de output is voor schommelingen in deze parameter.

3.6.1.1 Beschrijving alternatieve scenario's

In het basisscenario wordt aangenomen dat maximaal een half uur wordt gewacht op een arriverend schip. In scenario A verandert deze parameter in 20 minuten; in scenario B verandert de parameter in 40 minuten. Dezelfde replicatieparameters als voor het basisscenario (cfr. paragraaf 3.4.7) worden gebruikt bij de simulaties van scenario A en scenario B. In tabellen 13 en 14 worden de gemiddelde wachttijden en maximale wachttijden voor elke vaarrichting weergegeven in de drie scenario's. In tabel 15 wordt het benuttingspercentage van de sluiskamer per versassing in de drie scenario's weergegeven.

Tabel 13: Gemiddelde wachttijd i.f.v. het aantal minuten dat gewacht wordt op een arriverend schip

	Basisscenario	Scenario A	Scenario B
Gem. wachttijd schepen AW	21,85	14	34,47
Gem. wachttijd schepen OW	19,06	13,48	33,01

Tabel 14: Maximale wachttijd i.f.v. het aantal minuten dat gewacht wordt op een arriverend schip

	Basisscenario	Scenario A	Scenario B
Maximum wachttijd AW	106,86	63,68	195,35
Maximum wachttijd OW	116,45	64,73	175,06

Tabel 15: Benuttingspercentage sluiskamer i.f.v. het aantal minuten dat gewacht wordt op een arriverend schip

	Basisscenario	Scenario A	Scenario B
Benuttingspercentage sluiskamer per versassing AW	0,46	0,38	0,54
Benuttingspercentage sluiskamer per versassing OW	0,42	0,35	0,49

Het valt meteen op dat er zeer grote verschillen zijn tussen de scenario's, zowel in gemiddelde wachttijd als in maximale wachttijd. De gemiddelde en maximale wachttijd nemen toe als de parameter 'aantal minuten wachten met versassen toeneemt'. In de volgende sectie gaan we onderzoeken of de gemiddelde wachttijd significant verschilt in de scenario's. We merken daarenboven op dat het benuttingspercentage van de sluiskamer per versassing eveneens verschilt tussen de verschillende scenario's. Het benuttingspercentage neemt toe als langer gewacht wordt op een arriverend schip.

3.6.1.2 Gepaarde t-test van scenario A met basisscenario

In deze sectie wordt getest of de gemiddelde wachttijden van het basisscenario en van scenario A (maximaal 20 minuten wachten op een arriverend schip) statistisch significant verschillen van elkaar. Eerst zal dit gedaan worden voor de schepen die stroomopwaarts varen en dan voor de schepen die stroomafwaarts varen. Er zal hiervoor een **'paired t-test'** of een **gepaarde t-test** gebruikt worden. Voor deze test moet het aantal replicaties gelijk zijn in beide scenario's. Dat is hier het geval, aangezien er 20 replicaties zijn van elk scenario. De variabele gemiddelde wachttijd moet daarenboven onafhankelijk en identiek gedistribueerd zijn en een normale verdeling volgen. We gaan ervan uit dat voldaan wordt aan deze assumpties. De formule voor het betrouwbaarheidsinterval op basis van de gepaarde t-test wordt hieronder weergegeven. Indien de waarden in het betrouwbaarheidsinterval volledig positief of volledig negatief zijn, kan besloten worden dat de twee scenario's significant van elkaar verschillen op significantieniveau α . Indien nul wel tot het betrouwbaarheidsinterval behoort, verschillen de scenario's met andere woorden niet significant van elkaar.

$$\bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1;1-\alpha/2} \sqrt{\frac{\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)})}{n}}$$

Waarbij

$$\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)}) = \frac{\sum_{j=1}^n [Z_j - \bar{Z}_{(n)}]^2}{n-1}$$

$$Z_j = X_{1j} - X_{2j}$$

Met

t kritieke t-waarde uit de t-verdeling

α significantieniveau

n aantal replicaties (moeten voor beide scenario's dezelfde zijn; $n=n_1=n_2$)

X_{ij} gemiddelde geobserveerde wachttijd in replicatie j van scenario i ($i=1$ voor het basisscenario en $i=2$ voor scenario A)

In een eerste stap worden voor elke replicatie de gemiddelde wachttijd van de schepen die stroomopwaarts varen van het basisscenario naast deze van scenario A in een tabel geplaatst. Op die manier vormt er voor elke replicatie een ' $X_{1j}-X_{2j}$ ' paar, met één observatie uit het basisscenario en één observatie uit scenario A. In tabel 16 wordt dit weergegeven. In de

tweede stap, wordt het verschil Z_j genomen van elk 'paar'. Dit wordt weergegeven in de vierde kolom van tabel 16.

Tabel 16: Berekening gepaard t-interval basisscenario en scenario A van gemiddelde wachttijden van schepen stroomopwaarts

	X_{1j} (Gem. wachttijd basisscenario OW)	X_{2j} (Gem. wachttijd scenario A OW)	Z_j	$[Z_j - \bar{Z}_{(n)}]^2$
replicatie 1	0,2663	0,1703	0,096	0,00013666
replicatie 2	0,1538	0,2314	-0,0776	0,02621485
replicatie 3	0,3151	0,2612	0,0539	0,00092477
replicatie 4	0,2896	0,2596	0,03	0,00294958
replicatie 5	0,4357	0,2376	0,1981	0,01294816
replicatie 6	0,3012	0,2655	0,0357	0,00236293
replicatie 7	0,2517	0,2116	0,0401	0,00195452
replicatie 8	0,2524	0,2159	0,0365	0,0022858
replicatie 9	0,3386	0,2643	0,0743	0,0001002
replicatie 10	0,2758	0,2545	0,0213	0,00397026
replicatie 11	0,2226	0,1758	0,0468	0,001407
replicatie 12	0,5614	0,2828	0,2786	0,0377486
replicatie 13	0,1891	0,1487	0,0404	0,00192809
replicatie 14	0,2065	0,1529	0,0536	0,0009431
replicatie 15	0,4024	0,2637	0,1387	0,00295827
replicatie 16	0,2821	0,2156	0,0665	0,0003172
replicatie 17	0,2836	0,1321	0,1515	0,0045145
replicatie 18	0,3354	0,2888	0,0466	0,00142204
replicatie 19	0,3269	0,2796	0,0473	0,00136974
replicatie 20	0,4904	0,1825	0,3079	0,04999249

In de derde stap wordt het gemiddelde (\bar{Z}) van alle Z_j 's berekend.

$$\bar{Z} = \frac{\sum_{j=1}^n Z_j}{n} = \frac{1,6862}{20} \cong 0,08431$$

In de vierde stap wordt de variantie (\widehat{Var}) berekend. Hiervoor wordt eerst in de laatste kolom van tabel 16 $[Z_j - \bar{Z}_{(n)}]^2$ berekend. Op basis daarvan kan de formule van de variantie worden ingevuld.

$$\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)}) = \frac{\sum_{j=1}^n [Z_j - \bar{Z}_{(n)}]^2}{n-1} \cong \frac{0,156449}{19} \cong 0,00823414$$

In de laatste stap wordt het gepaarde t- 95% betrouwbaarheidsinterval opgesteld. De kritische t-waarde kan afgelezen worden uit een tabel met de t-verdeling.

$$t_{19;0,9795} = 2,093$$

$$\bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1;1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)})}{n}} = 0,08431 \pm 2,093 * \sqrt{\frac{0,00823414}{20}} = [0,04184 ; 0,12678]$$

Gezien het 95% betrouwbaarheidsinterval volledig positief is kunnen we besluiten dat de gemiddelde wachttijden voor de schepen die stroomopwaarts varen in scenario A statistisch verschillend zijn van de gemiddelde wachttijden in het basisscenario op het 5% significantieniveau. Indien 20 minuten gewacht wordt op een arriverend schip dat stroomopwaarts vaart (scenario A), zijn de gemiddelde wachttijden significant lager dan wanneer 30 minuten gewacht wordt (basisscenario).

Er wordt nu eveneens een betrouwbaarheidsinterval opgesteld op basis van de gepaarde t-test om de gemiddelde wachttijden te vergelijken van de schepen die stroomafwaarts varen in scenario A en in het basisscenario. Dezelfde stappen worden doorlopen als hierboven. De tabel met de berekeningen in stap 1 en stap 2 voor het gepaard t-interval is terug te vinden in bijlage (bijlage 7). Het gemiddelde (\bar{Z}) en de variantie (\widehat{Var}) worden hieronder berekend.

$$\bar{Z} = \frac{\sum_{j=1}^n Z_j}{n} = \frac{2,627}{20} \cong 0,13135$$

$$\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)}) = \frac{\sum_{j=1}^n [Z_j - \bar{Z}_{(n)}]^2}{n-1} \cong \frac{0,118115}{19} \cong 0,006217$$

In de laatste stap wordt het gepaarde t- 95% betrouwbaarheidsinterval opgesteld. De kritische t-waarde kan afgelezen worden uit een tabel met de t-verdeling.

$$t_{19;0,9795} = 2,093$$

$$\bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1;1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)})}{n}} = 0,13135 \pm 2,093 * \sqrt{\frac{0,006217}{20}} = [0,09445 ; 0,16825]$$

Het 95% betrouwbaarheidsinterval is opnieuw volledig positief. Dit betekent dat ook de gemiddelde wachttijden van de schepen die stroomafwaarts varen significant lager liggen in scenario A dan in het basisscenario.

3.6.1.3 Gepaarde t-test van scenario B met basisscenario

In deze sectie wordt getest of de gemiddelde wachttijden van het basisscenario en van scenario B (maximaal 40 minuten wachten op een arriverend schip) statistisch significant verschillen van elkaar. Eerst zal dit gedaan worden voor de schepen die stroomopwaarts varen en dan voor de schepen die stroomafwaarts varen. Hiervoor zal opnieuw een gepaarde t-test gebruikt worden. Dezelfde stappen worden doorlopen als in de vorige sectie. De tabel met de berekeningen uit stap 1 en 2 voor het gepaard t-interval kan worden teruggevonden in bijlage (bijlage 8). Het gemiddelde (\bar{Z}) en de variantie (\widehat{Var}) worden hieronder berekend.

$$\bar{Z} = \frac{\sum_{j=1}^n Z_j}{n} = \frac{-4,8252}{20} \cong -0,24126$$

$$\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)}) = \frac{\sum_{j=1}^n [Z_j - \bar{Z}_{(n)}]^2}{n-1} \cong \frac{0,34646}{19} \cong 0,018234$$

In de laatste stap wordt het gepaarde t- 95% betrouwbaarheidsinterval opgesteld. De kritische t-waarde kan afgelezen worden uit een tabel met de t-verdeling.

$$t_{19;0,9795} = 2,093$$

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1;1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)})}{n}} &= -0,24126 \pm 2,093 * \sqrt{\frac{0,018234}{20}} \\ &= [-0,30446 ; -0,17806]\end{aligned}$$

Het 95% betrouwbaarheidsinterval is volledig negatief. Dit betekent dat de gemiddelde wachttijden van de schepen die stroomopwaarts varen in scenario B significant hoger liggen dan in het basisscenario.

Er wordt nu eveneens een gepaard t-interval opgesteld voor de gemiddelde wachttijden van de schepen die stroomafwaarts varen in het basisscenario en scenario B. De tabel met de berekeningen uit stap 1 en 2 voor het gepaard t-interval kan worden teruggevonden in bijlage (bijlage 9). Het gemiddelde (\bar{Z}) en de variantie (\widehat{Var}) worden hieronder berekend.

$$\bar{Z} = \frac{\sum_{j=1}^n Z_j}{n} = \frac{-4,1969}{20} \cong -0,2098$$

$$\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)}) = \frac{\sum_{j=1}^n [Z_j - \bar{Z}_{(n)}]^2}{n-1} \cong \frac{0,40144}{19} \cong 0,021128$$

In de laatste stap wordt het gepaarde t- 95% betrouwbaarheidsinterval opgesteld. De kritische t-waarde kan afgelezen worden uit een tabel met de t-verdeling.

$$t_{19;0,9795} = 2,093$$

$$\bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1;1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)})}{n}} = -0,2098 \pm 2,093 * \sqrt{\frac{0,021128}{20}} = [-0,2779 ; -0,1418]$$

Het 95% betrouwbaarheidsinterval is opnieuw volledig negatief. Dit betekent dat de gemiddelde wachttijden van de schepen die stroomafwaarts varen eveneens significant hoger liggen in scenario B dan in het basisscenario.

3.6.1.4 Conclusies

Uit bovenstaande analyses blijkt dat het veranderen van de parameter 'aantal minuten wachten met versassen' een significante impact heeft op de gemiddelde wachttijd. De gemiddelde wachttijd in scenario A (20 minuten wachten op een aankomend schip) ligt significant lager dan in het basisscenario. De gemiddelde wachttijd in scenario B (40 minuten wachten op een aankomend schip) ligt significant hoger dan in het basisscenario. Om de wachttijden zo laag mogelijk te houden, kan dus best voor scenario A gekozen worden. Als echter naar de benuttingsgraad van de sluiskamer per versassing in tabel 15 gekeken wordt, zien we dat deze daalt met 7 procentpunten als we van het basisscenario naar scenario A gaan. De benuttingsgraad van scenario B ligt dan weer gemiddeld 7,5 procentpunten hoger dan de benuttingsgraad van het basisscenario. Een hogere benuttingsgraad per versassing, betekent meer schepen per versassing en bijgevolg minder versassingen. Voor elke versassing is energie nodig, dus minder versassingen levert een energiebesparing op. Vanuit dit standpunt, is het best om een zo hoog mogelijk benuttingspercentage te hebben en kan men best voor scenario B kiezen. Bij het bepalen van de waarde voor de parameter 'aantal minuten wachten met versassen' moet dus een afweging gemaakt worden tussen het beperken van de wachttijden enerzijds en het beperken van het energieverbruik anderzijds. Indien voorrang gegeven wordt aan het reduceren van de wachttijden, kan de parameter best de waarde 20 krijgen. Als voorrang gegeven wordt aan het reduceren van het energieverbruik, kan de parameter best de waarde 40 krijgen.

3.6.2 Sensitiviteit prioriteitsregel

In deze paragraaf wordt getest of het gebruik van een andere prioriteitsregel aan de sluis een verschil kan maken voor de wachttijden en het benuttingspercentage van de sluis. Aan de sluis in Diepenbeek wordt de prioriteitsregel First-In-First-Out gebruikt. De literatuurstudie (cfr. paragraaf 2.3) wees echter uit dat andere prioriteitsregels, zoals voorrang aan schepen met de kortste sluisbedieningstijd, een significante reductie van de gemiddelde wachttijd met zich mee kan brengen. In dit model wordt echter een triangulaire verdeling verondersteld voor de sluisbedieningstijden, die niet afhankelijk is van het type schip. Toch kan hier ook het gebruik van een andere prioriteitsregel een reductie van de wachttijd met zich meebrengen. Indien

voorrang gegeven wordt aan kleinere schepen, zouden meerdere kleinere schepen samen versast kunnen worden, in plaats van één groot schip. Dit kan de gemiddelde wachttijd van de schepen verminderen.

3.6.2.1 Beschrijving alternatief scenario

In het basisscenario wordt een FIFO principe toegepast. In het alternatief scenario wordt een 'kleinste oppervlakte eerst' principe toegepast in de wachtrijen. Dit wordt gedaan door bij de specificaties van de wachtrijen voorrang te geven aan 'lowest attribute value' of 'kleinste attribuut waarde'. Het attribuut dat gespecificeerd wordt is *Oppervlakte Schip*. Dezelfde replicatieparameters als voor het basisscenario (cfr. paragraaf 3.4.7) worden gebruikt bij de simulatie van het alternatief scenario. In tabel 17 en 18 staat een samenvatting van de gemiddelde wachttijden en de maximale wachttijden in elk scenario. In tabel 19 staat het gemiddelde benuttingspercentage per versassing in beide scenario's.

Tabel 17: Gemiddelde wachttijd i.f.v. de prioriteitsregel

Prioriteitsregel	FIFO	Kleinste Opp. Eerst
Gem. wachttijd schepen AW	21,85	21,58
Gem. wachttijd schepen OW	19,06	18,92

Tabel 18: Maximale wachttijd i.f.v. de prioriteitsregel

	FIFO	Kleinste opp. Eerst
Max. wachttijd schepen AW	106,86	107
Max. wachttijd schepen OW	116,45	181,73

Tabel 19: Benuttingspercentage sluiskamer per versassing i.f.v. de prioriteitsregel

	FIFO	Kleinste Opp. Eerst
Benuttingspercentage sluiskamer per versassing AW	0,46	0,46
Benuttingspercentage sluiskamer per versassing OW	0,42	0,42

We merken op dat er weinig tot geen verschil is in de gemiddelde wachttijden in beide scenario's. Er is echter wel een groot verschil in de maximale wachttijd van de schepen die stroomopwaarts varen. De maximale wachttijd is maar liefst 56% hoger in het 'kleinste oppervlakte eerst' scenario dan in het basisscenario. In de wetenschappelijke literatuur wordt dit fenomeen eveneens aangehaald (cfr. paragraaf 2.3). Een oplossing hiervoor is om een limiet te zetten op het aantal schepen dat een bepaald schip mogen passeren. Op die manier wordt vermeden dat de grote schepen té lang moeten wachten. Het benuttingspercentage van de sluiskamer per versassing verschilt tot slot niet in beide scenario's.

Gezien de gemiddelde wachttijden nauwelijks verschillen bij het gebruik van de andere prioriteitsregel, wordt geopteerd om geen gepaarde t-test hierop uit te voeren.

3.6.2.2 Conclusies

Uit bovenstaande paragraaf blijkt dat de gemiddelde wachttijd van de schepen die stroomafwaarts varen in het basisscenario niet verschilt met het scenario waar voorrang gegeven wordt aan de schepen met de kleinste oppervlakte. Voor de schepen die stroomopwaarts varen was het verschil zeer klein. We kunnen daarom besluiten dat op basis van de beschikbare gegevens, het veranderen van de prioriteitsregel van FIFO naar 'Kleinste Oppervlakte Eerst' geen belangrijke impact heeft op de gemiddelde wachttijd. Het benuttingspercentage van de sluiskamer per versassing verschilt eveneens niet in beide scenario's.

We merken wel op dat de maximale wachttijd bij de schepen die stroomopwaarts varen veel hoger lag in het 'Kleinste Oppervlakte Eerst' scenario. Dit probleem komt eveneens terug in de wetenschappelijke literatuur (cfr. paragraaf 2.3). Hierin wordt voorgesteld om een limiet te zetten op het aantal schepen dat een bepaald schip mag passeren, zodat een groot schip niet eindeloos moet wachten.

3.6.3 Sensitiviteit sluisbedieningstijd

In deze paragraaf wordt de impact van een reductie van de sluisbedieningstijd op de prestatieparameters onderzocht. Momenteel volgt de sluisbedieningstijd in het simulatiemodel een triangulaire verdeling met modus 18, minimum 16 en maximum 20. In de wetenschappelijke literatuur wordt aangehaald dat de bedieningstijden verlaagd zouden kunnen worden door een technische verbetering aan de sluis aan te brengen, of door het inzetten van helperbootjes die de passanten begeleiden om de sluis veilig en snel te passeren (cfr. paragraaf 2.3). Daarnaast zou een betere opleiding voor de sluisoperatoren een reductie in de sluisbedieningstijd kunnen teweegbrengen.

3.6.3.1 Beschrijving alternatief scenario

De sluisbedieningstijd volgt in het alternatief scenario een triangulaire verdeling met modus 16 minuten, minimum 14 minuten en maximum 18 minuten. De modus, het minimum en het maximum van de verdeling van de sluisbedieningstijd worden dus met twee minuten gereduceerd ten opzichte van het basisscenario. Dezelfde replicatieparameters als voor het basisscenario (cfr. paragraaf 3.4.7) worden gebruikt bij de simulatie van het alternatief scenario. In tabellen 20 en 21 staan de gemiddelde wachttijden de maximale wachttijden in beide scenario's. In tabel 22 wordt de gemiddelde benuttingsgraad per versassing weergegeven. In tabel 23 tot slot wordt de gemiddelde systeemtijd weergegeven.

Tabel 20: Gemiddelde wachttijd i.f.v. de bedieningstijd

Prioriteitsregel	Bedieningstijd TRIA(16,18,20)	Bedieningstijd TRIA(14,16,18)
Gem. wachttijd schepen AW	21,85	21,38
Gem. wachttijd schepen OW	19,06	17,83

Tabel 21: Maximale wachttijd i.f.v. de bedieningstijd

Prioriteitsregel	Bedieningstijd TRIA(16,18,20)	Bedieningstijd TRIA(14,16,18)
Max. wachttijd schepen AW	106,86	106,85
Max. wachttijd schepen OW	116,45	114,45

Tabel 22: Benuttingspercentage sluiskamer i.f.v. de bedieningstijd

	Bedieningstijd TRIA(16,18,20)	Bedieningstijd TRIA(14,16,18)
Benuttingspercentage sluiskamer per versassing AW	0,46	0,45
Benuttingspercentage sluiskamer per versassing OW	0,42	0,42

Tabel 23: Gemiddelde systeemtijd i.f.v. de bedieningstijd

Prioriteitsregel	Bedieningstijd TRIA(16,18,20)	Bedieningstijd TRIA(14,16,18)
Gem. systeemtijd schepen AW	40,13	37,49
Gem. systeemtijd schepen OW	35,52	33,88

We merken op dat de gemiddelde wachttijd voor de schepen die stroomafwaarts varen slechts weinig verschilt in beide scenario's. De gemiddelde wachttijd van de schepen die stroomopwaarts varen daarentegen ligt wel 6,5% lager in het scenario van een kortere

bedieningstijd in vergelijking met het basisscenario. Met behulp van een gepaarde t-test gaan we onderzoeken of dit verschil significant is. Daarnaast merken we op dat de maximale wachttijd en de benuttingsgraad nauwelijks verschillen tussen beide scenario's. De gemiddelde systeemtijd in beide vaarrichtingen verschilt wel voor beide scenario's. Dit verschil wordt eveneens onderzocht met een gepaarde t-test.

3.6.3.2 Gepaarde t-test van gemiddelde wachttijd basisscenario met alternatief scenario

In deze sectie wordt getest of de gemiddelde wachttijden van het basisscenario en van het alternatief scenario (bedieningstijd: TRIA (14,16,18)) statistisch significant verschillen van elkaar. Eerst zal dit gedaan worden voor de schepen die stroomopwaarts varen en dan voor de schepen die stroomafwaarts varen. Hiervoor zal opnieuw een gepaarde t-test gebruikt worden. In bijlage kan de tabel met de berekeningen van stap 1 en 2 voor het gepaard t-interval van de gemiddelde wachttijden stroomopwaarts worden teruggevonden (bijlage 10). Het gemiddelde (\bar{Z}) en de variantie (\widehat{Var}) worden hieronder berekend.

$$\bar{Z} = \frac{\sum_{j=1}^n Z_j}{n} = \frac{0,2369}{20} \cong 0,01845$$

$$\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)}) = \frac{\sum_{j=1}^n [Z_j - \bar{Z}_{(n)}]^2}{n-1} \cong \frac{0,10476}{19} \cong 0,005514$$

In de laatste stap wordt het gepaarde t- 95% betrouwbaarheidsinterval opgesteld. De kritische t-waarde kan afgelezen worden uit een tabel met de t-verdeling.

$$t_{19;0,9795} = 2,093$$

$$\bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1;1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)})}{n}} = 0,01845 \pm 2,093 * \sqrt{\frac{0,005514}{20}} = [-0,022906 ; 0,046596]$$

Het 95% betrouwbaarheidsinterval bevat deze keer wel nul. Dit betekent dat er op het 5% significantieniveau geen verschil is tussen de wachttijden van de schepen die stroomopwaarts varen in het basisscenario en deze wachttijden in het alternatief scenario.

Er wordt eveneens een gepaard t-interval opgesteld voor de gemiddelde wachttijden van de schepen die stroomafwaarts varen in het basisscenario en in het alternatief scenario. In bijlage kan de tabel met de berekeningen van stap 1 en 2 voor het gepaard t-interval van de gemiddelde wachttijden stroomafwaarts worden teruggevonden (bijlage 11). Het gemiddelde (\bar{Z}) en de variantie (\widehat{Var}) worden hieronder berekend.

$$\bar{Z} = \frac{\sum_{j=1}^n Z_j}{n} = \frac{0,1671}{20} \cong 0,008355$$

$$\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)}) = \frac{\sum_{j=1}^n [Z_j - \bar{Z}_{(n)}]^2}{n-1} \cong \frac{0,025111}{19} \cong 0,001322$$

In de laatste stap wordt het gepaarde t- 95% betrouwbaarheidsinterval opgesteld. De kritische t-waarde kan afgelezen worden uit een tabel met de t-verdeling.

$$t_{19;0,9795} = 2,093$$

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1;1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)})}{n}} &= 0,008355 \pm 2,093 * \sqrt{\frac{0,001322}{20}} \\ &= [-0,008659; 0,0025369] \end{aligned}$$

Het 95% betrouwbaarheidsinterval bevat opnieuw de waarde nul. Dit betekent dat er op het 5% significantieniveau geen verschil is tussen de wachttijden van de schepen die stroomafwaarts varen in het basisscenario en deze wachttijden in het alternatief scenario.

Om te onderzoeken bij welke verdeling van de bedieningstijd de gemiddelde wachttijd wel significant verschilt met het basisscenario worden nieuwe alternatieve scenario's opgesteld. In elk scenario worden de waarden van de parameters van de triangulaire verdeling telkens met

één verminderd ten opzichte van het vorige alternatieve scenario. De gepaarde t-test met het basisscenario wordt op deze nieuwe alternatieve scenario's uitgevoerd. Bij het scenario waarbij de bedieningstijden een triangulaire verdeling met modus 14, minimum 12 en maximum 16 volgen was de gemiddelde wachttijd van de schepen in beide vaarrichtingen significant verschillend van het basisscenario. In het vervolg van deze paragraaf wordt de berekening van het gepaard t-interval van de gemiddelde wachttijd van het basisscenario met het *nieuwe alternatieve scenario* (waarbij de bedieningstijd een TRIA(12,14,16) verdeling volgt) weergegeven. In bijlage kan de tabel met de berekeningen van stap 1 en 2 voor het gepaard t-interval van de gemiddelde wachttijden stroomopwaarts worden teruggevonden (bijlage 12). Het gemiddelde (\bar{Z}) en de variantie (\widehat{Var}) worden hieronder berekend.

$$\bar{Z} = \frac{\sum_{j=1}^n Z_j}{n} = \frac{0,7447}{20} \cong 0,037235$$

$$\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)}) = \frac{\sum_{j=1}^n [Z_j - \bar{Z}_{(n)}]^2}{n-1} \cong \frac{0,118743}{19} \cong 0,00625$$

In de laatste stap wordt het gepaarde t- 95% betrouwbaarheidsinterval opgesteld. De kritische t-waarde kan afgelezen worden uit een tabel met de t-verdeling.

$$t_{19;0,9795} = 2,093$$

$$\bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1;1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)})}{n}} = 0,037235 \pm 2,093 * \sqrt{\frac{0,00625}{20}} = [0,000237 ; 0,074233]$$

Het 95% betrouwbaarheidsinterval is volledig positief. Dit betekent dat er op het 5% significantieniveau een verschil is tussen de wachttijden van de schepen die stroomopwaarts varen in het basisscenario en deze wachttijden in het alternatief scenario. De wachttijden van de schepen die stroomopwaarts varen bij een bedieningstijd van TRIA(14,16,18) zijn significant korter dan de wachttijden bij een bedieningstijd van TRIA(16,18,20).

Er wordt eveneens een gepaard t-interval opgesteld voor de gemiddelde wachttijden van de schepen die stroomafwaarts varen in het basisscenario en in het nieuwe alternatieve scenario. In bijlage kan de tabel met de berekeningen van stap 1 en 2 voor het gepaard t-interval van de gemiddelde wachttijden stroomafwaarts worden teruggevonden (bijlage 13). Het gemiddelde (\bar{Z}) en de variantie (\widehat{Var}) worden hieronder berekend.

$$\bar{Z} = \frac{\sum_{j=1}^n Z_j}{n} = \frac{1,267}{20} \cong 0,06355$$

$$\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)}) = \frac{\sum_{j=1}^n [Z_j - \bar{Z}_{(n)}]^2}{n - 1} \cong \frac{0,104513}{19} \cong 0,005501$$

In de laatste stap wordt het gepaarde t -95% betrouwbaarheidsinterval opgesteld. De kritische t-waarde kan afgelezen worden uit een tabel met de t-verdeling.

$$t_{19;0,9795} = 2,093$$

$$\bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1;1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)})}{n}} = 0,06355 \pm 2,093 * \sqrt{\frac{0,005501}{20}} = [0,028639 ; 0,098061]$$

Het 95% betrouwbaarheidsinterval is opnieuw volledig positief. Dit betekent dat de gemiddelde wachttijd van de schepen die stroomafwaarts varen eveneens significant lager ligt in het alternatieve scenario met bedieningstijd TRIA(12,14,16) dan in het basisscenario.

3.6.3.3 Gepaarde t-test van gemiddelde systeemtijd basisscenario met alternatief scenario

In deze sectie wordt getest of de gemiddelde systeemtijd van de schepen in het basisscenario en in het alternatief scenario (waarbij de bedieningstijd een TRIA(14,16,18) verdeling volgt) statistisch significant verschillen van elkaar. Eerst zal dit gedaan worden voor de schepen die stroomopwaarts varen en dan voor de schepen die stroomafwaarts varen. Hiervoor zal opnieuw een gepaarde t-test gebruikt worden. In bijlage kan de tabel met de berekeningen

van stap 1 en 2 voor het gepaard t-interval van de gemiddelde systeemtijd stroomopwaarts worden teruggevonden (bijlage 14). Het gemiddelde (\bar{Z}) en de variantie (\widehat{Var}) worden hieronder berekend.

$$\bar{Z} = \frac{\sum_{j=1}^n Z_j}{n} = \frac{1,0777}{20} \cong 0,053885$$

$$\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)}) = \frac{\sum_{j=1}^n [Z_j - \bar{Z}_{(n)}]^2}{n-1} \cong \frac{0,075522}{19} \cong 0,003975$$

In de laatste stap wordt het gepaarde t- 95% betrouwbaarheidsinterval opgesteld. De kritische t-waarde kan afgelezen worden uit een tabel met de t-verdeling.

$$t_{19;0,9795} = 2,093$$

$$\bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1;1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)})}{n}} = 0,053885 \pm 2,093 * \sqrt{\frac{0,003975}{20}} = [0,0243788 ; 0,083391]$$

Het 95% betrouwbaarheidsinterval is volledig positief. De gemiddelde systeemtijd van de schepen die stroomafwaarts varen ligt significant lager in het alternatief scenario met bedieningstijd TRIA(14,16,18) dan in het basisscenario.

Er wordt eveneens een gepaard t-interval opgesteld voor de gemiddelde systeemtijd van de schepen die stroomafwaarts varen in het basisscenario en in het nieuwe alternatieve scenario. In bijlage kan de tabel met de berekeningen van stap 1 en 2 voor het gepaard t-interval van de gemiddelde systeemtijd stroomafwaarts worden teruggevonden (bijlage 15). Het gemiddelde (\bar{Z}) en de variantie (\widehat{Var}) worden hieronder berekend.

$$\bar{Z} = \frac{\sum_{j=1}^n Z_j}{n} = \frac{0,8198}{20} \cong 0,04099$$

$$\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)}) = \frac{\sum_{j=1}^n [Z_j - \bar{Z}_{(n)}]^2}{n-1} \cong \frac{0,02513}{19} \cong 0,001323$$

In de laatste stap wordt het gepaarde t- 95% betrouwbaarheidsinterval opgesteld. De kritische t-waarde kan afgelezen worden uit een tabel met de t-verdeling.

$$t_{19;0,9795} = 2,093$$

$$\bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1;1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)})}{n}} = 0,04099 \pm 2,093 * \sqrt{\frac{0,001323}{20}} = [0,0239694 ; 0,058011]$$

Het 95% betrouwbaarheidsinterval is opnieuw volledig positief. Dit betekent dat de gemiddelde systeemtijd van de schepen die stroomafwaarts varen eveneens significant lager ligt in het alternatieve scenario met bedieningstijd TRIA(14,16,18) dan in het basisscenario.

3.6.3.4 Conclusies

Uit bovenstaande paragrafen blijkt dat de wachttijden uit het alternatieve scenario met bedieningstijd TRIA(14,16,18) niet significant verschillen van de wachttijden uit het basisscenario waarbij de bedieningstijd een TRIA(16,18,20) verdeling volgt. Deze oplossing draagt dus niet significant bij tot het verminderen van de wachttijden aan de sluis in Diepenbeek. De gemiddelde systeemtijd verschilt wel significant tussen de twee scenario's. De systeemtijd in het alternatieve scenario met de kortere bedieningstijden (TRIA(14,16,18)) ligt significant lager dan de systeemtijd in het basisscenario met de reële bedieningstijden (TRIA(16,18,20)). Schepen zullen dus wel significant minder tijd verliezen bij de sluis in Diepenbeek indien de waarden van de modus, het minimum en het maximum van de triangulaire verdeling van de bedieningstijden gereduceerd worden met twee minuten. De maximale wachttijd en het benuttingspercentage van de sluiskamer per versassing verschillen nagenoeg niet in beide scenario's.

Eveneens werd onderzocht bij welke verdeling van de bedieningstijden er wel een significant verschil is in gemiddelde wachttijd ten opzichte van het basisscenario. Bij een verdeling van de sluisbedieningstijd van TRIA(12,14,16) bleek dat de gemiddelde wachttijd van zowel de

schepen die stroomopwaarts varen als de schepen die stroomafwaarts varen significant lager liggen dan in het basisscenario. Het wordt echter in vraag gesteld of een vermindering van vier minuten van de modus, het minimum en het maximum van de verdeling van de bedieningstijd realistisch is. Dit zou immers een reductie betekenen van de modus, het minimum en het maximum van respectievelijk 22%, 25% en 20% ten opzichte van de huidige situatie aan de sluis in Diepenbeek.

3.7 Beperkingen simulatiemodel

Er werd getracht om de werking van de sluis zo getrouw mogelijk weer te geven in het simulatiemodel. Toch heeft het model enkele beperkingen, waardoor de werking van het simulatiemodel verschillen kan vertonen met de effectieve werking van de sluis in Diepenbeek. In deze sectie worden deze beperkingen besproken.

Een eerste beperking is dat de aankomstgegevens dateren van maart 2007. Het kan dus zijn dat deze niet meer volledig overeenkomen met de huidige situatie. Een volgende beperking is te wijten aan de werking van het simulatiemodel. Indien een schip dat niet meer in de sluiskamer past in de wachtrij van de module '*Wachtrij stroomopwaarts*' staat, wordt een eventueel volgend schip dat kleiner is en wel nog in de sluiskamer past, niet doorgelaten naar de sluiskamer door het gebruik van het FIFO principe in de wachtrij. We nemen aan dat in realiteit, ook al wordt een FIFO procedure toegepast, het kleinere schip dat wel nog in de sluiskamer zou passen wel wordt doorgelaten. Deze optie wordt echter niet opgenomen in het simulatiemodel, waardoor de gesimuleerde wachttijden hoger zouden kunnen zijn dan in werkelijkheid.

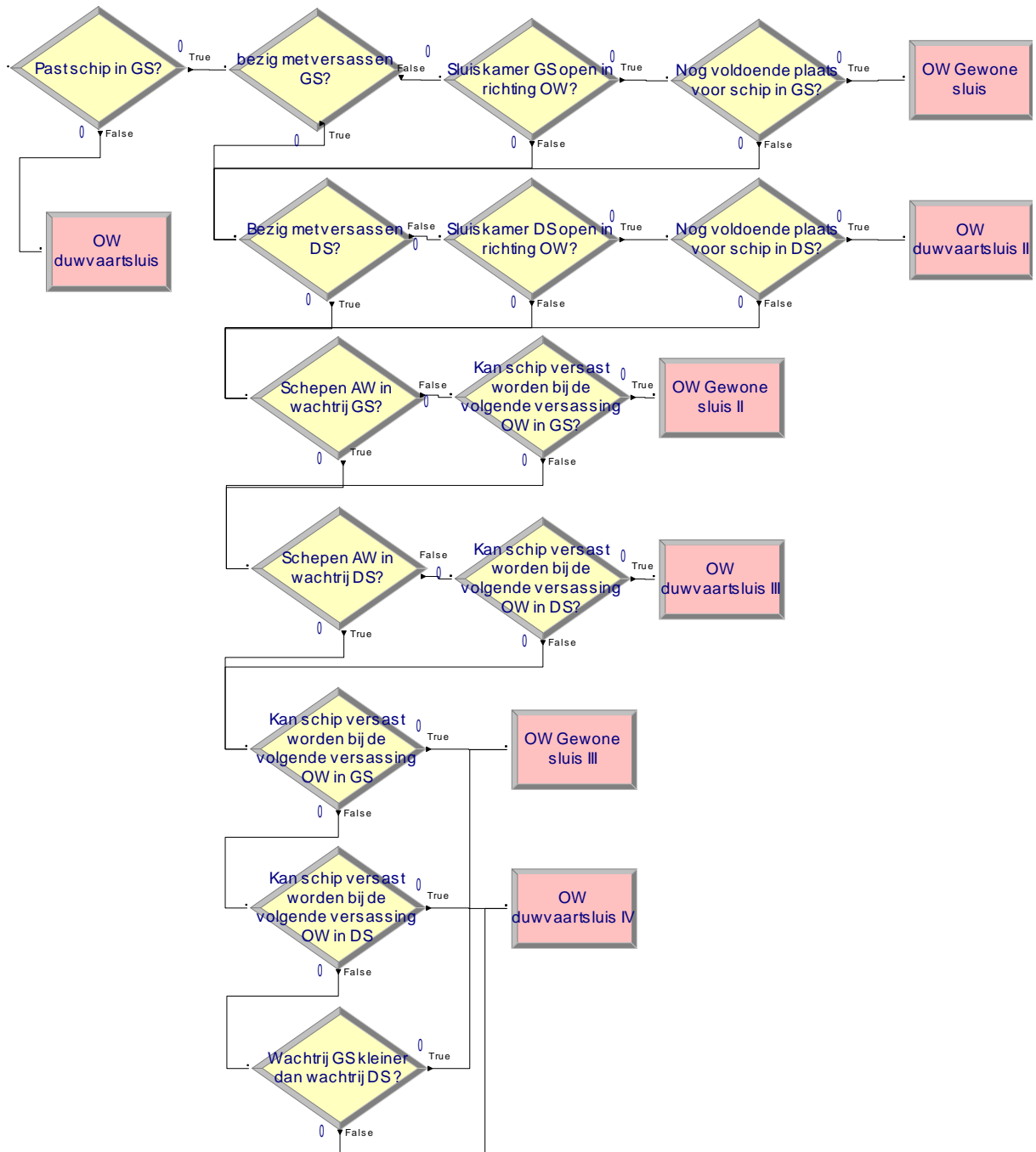
Een derde beperking is dat het model slechts één sluiskamer simuleert terwijl in werkelijkheid nog twee kleinere sassen aanwezig zijn in de sluis van Diepenbeek. Daarnaast wordt slechts één sluis gemodelleerd. Het literatuuronderzoek wijst echter uit dat afhankelijkheid kan bestaan tussen nabijgelegen sluisen. Gezien de zeer korte afstand waarop de sluis in Diepenbeek ligt van de sluisen in Genk en Hasselt, is het aannemelijk dat de sluis in Diepenbeek zeer afhankelijk is van de aangrenzende sluisen. Hierdoor is het mogelijk dat oplossingen om de wachttijden te verminderen aan de sluis in Diepenbeek deels teniet gedaan

worden doordat de schepen bijvoorbeeld langer moeten wachten aan de volgende sluis. Dit simulatiemodel vormt daarom eerder een basis voor een model met meerdere sluis kamers en eventueel meerdere sluisen, waarin maatregelen om de wachttijden te reduceren voor de binnenvaart op het Albertkanaal realistisch getest kunnen worden.

3.8 Toekomstig onderzoek

In deze paragraaf worden verschillende topics aangehaald voor mogelijk toekomstig onderzoek naar de wachttijden aan de sluisen van het Albertkanaal. Verder werd reeds nagedacht over hoe het beslissingsmodel bij meerdere sluis kamers er kan uit zien in een eerste stap naar de uitbreiding van het model.

Een eerste piste voor toekomstig onderzoek is het uitbreiden van het simulatiemodel dat ontworpen werd in deze masterthesis. Een tweede (en derde) sluis kamer kan worden toegevoegd om het realisme van het simulatiemodel te verhogen. De sluis van Diepenbeek bestaat uit drie sluis kamers: één duwvaartsas (24m * 200m) en twee gewone sassen (16m * 136m). De duwvaartsas is reeds aanwezig in het simulatiemodel met één sluis kamer. De tweede (en/of derde) sluis kamer zou dus de oppervlakte moeten hebben van de gewone sas. Zoals eveneens gedaan wordt bij de duwvaartsluis, kan best een marge van 10% genomen worden, waardoor de beschikbare oppervlakte van de kleine sluis kamer 1958 m² is. De werking van de gewone sas is identiek aan die van de duwvaartsas. Op basis van een beslissingsmodel dient bepaald te worden in welke sluis kamer een arriverend schip versast wordt. Caris et al. (2010) vermelden dat geen vaste regels bestaan voor de toewijzing van de schepen aan de sluis kamers. De sluis operator beslist naar eigen goeddunken hierover. Op basis van logisch redeneren werd in deze masterthesis reeds een beslissingsmodel ontwikkeld voor het toewijzen van schepen in de sluis kamers indien twee sluis kamers gemodelleerd worden. In figuur 23 wordt dit beslissingsmodel in Arena voor de schepen die stroomopwaarts varen weergegeven.



Figuur 23: Mogelijk beslissingsmodel plaatsing schepen die stroomopwaarts varen (OW) in de sluis kamers

Hieronder wordt het beslissingsmodel toegelicht. Het beslissingsmodel voor de schepen die stroomafwaarts varen is analoog.

Eerst wordt nagegaan of de oppervlakte van het schip, de oppervlakte van de gewone sluiskamer (GS) overschrijdt. Indien dit het geval is, gaat het schip meteen naar de wachtrij van de duwvaart sluiskamer (DS). Indien het schip niet te groot is voor de gewone sluiskamer, wordt de beslissing gemaakt op basis van de beschikbaarheid van de sluiskamers. Indien er een gelijkaardige beschikbaarheid is in beide sluiskamers, wordt voorkeur gegeven aan de plaatsing in de kleinste sluiskamer, gezien dit een kortere sluisbedieningstijd in beslag neemt. Voor het bepalen van de beschikbaarheid, wordt eerst nagegaan of de sluiskamer bezig is met versassen. Indien dit niet het geval is, wordt onderzocht of de sluiskamer open staat in de juiste vaarrichting (stroomopwaarts). Indien dit het geval is, wordt gekeken of de beschikbare oppervlakte in de sluiskamer groot genoeg is voor het schip. Indien de beschikbare oppervlakte groot genoeg is, wordt het schip geplaatst in de desbetreffende sluiskamer. Dit wordt eerst getest voor de kleinere sluiskamer (GS) en dan voor de grotere sluiskamer (DS). Indien in geen van beide sluiskamers het schip geplaatst wordt op basis van bovenstaande voorwaarden, wordt nagegaan of er schepen staan in de wachtrij om stroomafwaarts te varen. Indien dit niet het geval is, wordt gekeken of het schip versast kan worden bij de volgende versassing stroomopwaarts. Indien dit het geval is, wordt het schip geplaatst in de desbetreffende sluiskamer. Opnieuw wordt dit eerst getest voor de kleinste sluiskamer. Indien het schip op basis van deze voorwaarden niet geplaatst werd in een sluiskamer, wordt enkel gekeken of het schip bij de volgende versassing in de sluiskamer in de richting stroomopwaarts kan versast worden. Indien dit bij beide sluiskamers niet het geval is, wordt gekeken naar de lengte van de wachtrijen van de sluiskamers. Indien meer schepen die stroomopwaarts varen staan in de wachtrij van de gewone sluiskamer, dan in de wachtrij van de duwvaartsluiskamer, wordt het schip geplaatst in de wachtrij van de gewone sluiskamer. Anders wordt het geplaatst in de wachtrij van de duwvaartsluiskamer.

Een andere mogelijke uitbreiding is het toevoegen van de andere sluizen van het Albertkanaal in het simulatiemodel. Op die manier kan rekening gehouden worden met de afhankelijkheid tussen de sluizen bij het onderzoeken van mogelijke oplossingen om de wachttijden te reduceren op het Albertkanaal. In een simulatiemodel met slechts één sluis bestaat namelijk de kans dat oplossingen om de wachttijden te verminderen aan de sluis deels teniet gedaan worden doordat de schepen bijvoorbeeld langer moeten wachten aan de volgende sluis. Op basis van een simulatiemodel dat alle sluizen van het Albertkanaal modelleert zouden

bovendien synchronisatiestrategieën kunnen worden opgemaakt om de wachttijden op het Albertkanaal te verminderen.

Een derde mogelijke onderzoekspiste is het ontwikkelen van mathematische modellen om de wachttijden aan de sluizen in het Albertkanaal te schatten. In de wetenschappelijke literatuur werden reeds verschillende metamodellen en artificiële neurale netwerkmodellen ontwikkeld voor het modelleren van wachttijden aan sluizen (cfr. paragraaf 2.4). De voordelen hiervan zijn dat de verwerkingstijd in deze modellen aanzienlijk lager ligt dan een simulatiemodel. Deze snelle verwerkingstijd gaat wel ten koste van de juistheid van de modellering.

4. CONCLUSIES

In deze masterproef werd onderzocht hoe wachttijden aan sluzen gemodelleerd en gereduceerd kunnen worden. De belangrijkste conclusies komen in dit hoofdstuk aan bod. Eerst worden de oplossingen en modellen die werden teruggevonden in de wetenschappelijke literatuur besproken. Daarna komen de conclusies aan bod van het praktijkonderzoek waarin enkele oplossingen om wachttijden te reduceren werden getest in een simulatiemodel. Tot slot worden de beperkingen van het onderzoek aangehaald en worden aanbevelingen gemaakt voor toekomstig onderzoek omtrent de wachttijden aan sluzen langs het Albertkanaal.

4.1 Conclusies uit het onderzoek

In de wetenschappelijke literatuur worden verschillende oplossingen aangehaald om de wachttijden aan sluzen te reduceren. Afhankelijk van de aard van het congestieprobleem, zijn sommige oplossingen beter geschikt dan andere. De meest ingrijpende oplossing is het aanbrengen van structurele sluisverbeteringen die zorgen voor een capaciteitsuitbreiding van de sluis. Dit is de meest effectieve manier om een structureel capaciteitstekort aan een sluis aan te pakken. Dit is echter ook de oplossing die de hoogste investeringskost met zich meebrengt. Het is daarom nuttig om eerst te onderzoeken of sprake is van een capaciteitsprobleem, of als de wachttijden eveneens kunnen gereduceerd worden op een andere manier. Een alternatief is bijvoorbeeld het gebruik van efficiënte prioriteitsregels. Prioriteitsregels die voorrang geven aan schepen met de kortste sluisbedieningstijd (SPF) zorgen voor kortere wachttijden dan de klassieke First-In-First-Out (FIFO) regel. Een 'fairness beperking' kan worden opgelegd om te vermijden dat bepaalde schepen te lang moeten wachten. Deze 'fairness beperking' plaatst een maximum op het aantal schepen dat een bepaald schip mogen voorbijgaan in de rij. Gezien deze beperking ten koste gaat van de efficiëntie van het systeem, zal een afweging gemaakt moeten worden tussen de eerlijkheid en de efficiëntie van het wachtrijsysteem. Een andere oplossing is een planningssysteem waarbij schippers op voorhand een afspraak dienen te maken om de sluis te passeren. De schippers weten dan exact op welk tijdstip ze bij de sluis moeten aankomen en kunnen hun snelheid hieraan aanpassen. Niet alleen de wachttijden, maar eveneens het brandstofverbruik zou hierdoor dus gereduceerd kunnen worden. Bedrijven die grote ladingen via de binnenvaart

vervoeren kunnen ook zelf hun wachttijden reduceren door het gebruik van 'online simulatiemodellen'. Via deze modellen krijgen de 'dispatchers' van de bedrijven 'real time' informatie over de huidige en voorspelde congestie op de waterwegen. Op basis hiervan kunnen ze de vrachten plannen of herplannen. Wanneer tot slot enkel in bepaalde drukke periodes de wachttijden hoog oplopen, zoals in de zomer wanneer veel recreatievaart op de waterwegen aanwezig is, kunnen helperbootjes of stewards worden ingezet om schepen te helpen om de sluis snel en veilig te passeren.

Om de invloed op de wachttijden van een bepaalde oplossing ex ante te evalueren is het nodig om de wachttijden aan de sluis te kunnen modelleren. In de literatuurstudie worden vier manieren aangehaald om wachttijden aan sluisen te modelleren. De keuze tussen de verschillende modellen hangt grotendeels af van het doel waarvoor het model ontwikkeld wordt. Indien enkel een globaal beeld dient te worden verkregen van de wachttijden op basis van het model, kan gekozen worden voor wachtrijtheorie. De formules vanuit de wachtrijtheorie zijn reeds voorhanden en geven zeer snel een ruwe schatting van de wachttijden. Indien echter belangrijk is dat de wachttijden zo accuraat mogelijk geschat worden, is een simulatiemodel de beste keuze. Een simulatiemodel kan de volledige sluiswerking tot in detail simuleren waardoor de output zeer realistisch is. Indien waarde gehecht wordt aan de juistheid van de modellering, maar toch ook de rekentijd van het model tot een minimum beperkt moet worden, kan een metamodel gebruikt worden. Metamodellen zijn modellen geschat op basis van gesimuleerde data. Het ontwikkelen van een goed metamodel is complex. Echter eens het metamodel ontwikkeld is, neemt het aanzienlijk minder rekentijd in beslag dan simulatiemodellen, hetgeen vaak cruciaal is wanneer operationele beslissingen genomen moeten worden. Een alternatief voor een metamodel is tot slot een artificieel neurale netwerkmodel. Zoals bij een metamodel is het ontwikkelen van een neurale netwerkmodel complex en tijdrovend maar neemt het model zelf minder verwerkingstijd in beslag dan een simulatiemodel. Een neurale netwerkmodel is daarenboven beter geschikt voor complexe netwerken dan metamodellen. Een combinatie van de modellen kan eveneens gebruikt worden. Zo kunnen alternatieve investeringsprojecten om de wachttijden aan sluisen te reduceren eerst gescreend worden op basis van een metamodel of een neurale netwerkmodel. De 'overgebleven alternatieven' kunnen dan op basis van een uitgebreid simulatiemodel met elkaar vergeleken worden.

In het praktijkonderzoek wordt een simulatiemodel in het computerprogramma Arena ontwikkeld van de binnenvaarttrafiek aan de sluis in Diepenbeek op het Albertkanaal. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een dataset van NV De Scheepvaart over de aankomsten van schepen aan de sluis in maart 2007. De sluis in Diepenbeek bestaat uit drie sassen: een duwvaartsas (24m*200m) en twee kleinere sassen (16m*136m). Het simulatiemodel modelleert enkel de duwvaartsas. In het aankomstenpatroon waren duidelijk groepjes van schepen zichtbaar die samen aankwamen bij de sluis. Een mogelijke verklaring hiervoor is de afhankelijkheid van de sluis in Diepenbeek aan de nabijgelegen sluizen in Hasselt en Genk. Hierdoor komen de schepen die samen versast werden in de sluis van Hasselt of Genk in groepjes aan bij de sluis van Diepenbeek. Uit de analyse in 'input analyser', een tool van Arena, bleek dat de tussenaankomsttijden aan de sluis van zowel de schepen als de groepjes van schepen niet benaderd konden worden met een kansverdeling. In het simulatiemodel werden daarom de geobserveerde aankomsttijden gebruikt. Uit de resultaten bleek dat dagelijks gemiddeld 39 schepen stroomafwaarts versast werden en 35 schepen stroomopwaarts. Hoewel het aantal passanten per dag dus relatief laag is, werden toch veel schepen gebundeld gezien dagelijks gemiddeld slechts 28 versassingen plaatsvonden. De verklaring hiervoor is dat de schepen in groepjes aankomen bij de sluis, waardoor ze samen versast kunnen worden. Hierdoor was de gemiddelde benuttingsgraad van de sluiskamer van 44% per versassing acceptabel. De gemiddelde systeemtijd was circa 38 minuten waarvan een gemiddelde wachttijd van 20 minuten. De maximale wachttijd was 116 minuten. Deze wachttijden lijken op het eerste zicht relatief hoog voor een vervoersmiddel dat een alternatief zou moeten zijn voor de files op de weg. Er dient echter rekening te worden gehouden met het feit dat slechts één sluiskamer gemodelleerd wordt en dat in werkelijkheid nog twee andere sluiskamers aanwezig zijn in de sluis van Diepenbeek. In werkelijkheid zullen de wachttijden en de systeemtijd dus lager liggen.

Aan de hand van een sensitiviteitsanalyse werd de invloed op de wachttijd en de benuttingsgraad onderzocht bij een verandering van het model. Twee oplossingen die werden aangereikt vanuit de literatuurstudie om de wachttijden aan sluizen te verminderen werden op die manier getoetst in het model. Eerst werd de impact op de wachttijd van het veranderen van de prioriteitsregel van FIFO naar 'Kleinste Oppervlakte Eerst' gemeten. Dit bleek

nauwelijks een invloed uit te oefenen op de gemiddelde wachttijd en op de benuttingsgraad. Daarnaast werden de parameters van de verdeling van de sluisbedieningstijd gereduceerd. De bedieningstijd zou bijvoorbeeld kunnen verlagen door technische verbeteringen aan de sluis. Wanneer het minimum, de modus en het maximum van de triangulaire verdeling van de bedieningstijden verminderd werden met twee minuten, was er geen significant verschil in gemiddelde wachttijd ten opzichte van het basisscenario. De systeemtijd daarentegen verschilde wel significant in beide scenario's. Schepen zouden dus significant minder tijd verliezen aan de sluis indien de waarden van de parameters van de triangulaire verdeling met twee minuten gereduceerd kunnen worden. De maximale wachttijd en de benuttingsgraad verschilden nagenoeg niet in beide scenario's. Pas wanneer het minimum, de modus en het maximum van de triangulaire verdeling van de bedieningstijden verminderd werden met vier minuten, lag eveneens de gemiddelde wachttijd significant lager dan in het basisscenario. Dit zou dus een manier kunnen zijn om de wachttijden aan de sluis te reduceren. Tot slot bleek uit de sensitiviteitsanalyse dat de waarde van de parameter 'aantal minuten wachten met versassen' een significante invloed uitoefent op de wachttijd. Deze parameter bepaalt hoe lang gewacht wordt met versassen op een schip dat nog moet arriveren aan de sluis. In het basisscenario werd aangenomen dat maximaal 30 minuten gewacht wordt op een arriverend schip. Uit de sensitiviteitsanalyse blijkt dat wanneer maximaal 20 minuten gewacht wordt op een arriverend schip, de gemiddelde wachttijd significant lager ligt dan in het basisscenario. De benuttingsgraad ligt echter eveneens lager dan in het basisscenario. Een lagere benuttingsgraad betekent meer versassingen en bijgevolg een groter energieverbruik. We kunnen besluiten dat bij het bepalen van de parameter 'aantal minuten wachten met versassen' een afweging gemaakt dient te worden tussen het beperken van de wachttijden enerzijds en het beperken van het energieverbruik anderzijds.

4.2 Beperkingen en suggesties voor toekomstig onderzoek

De aankomstgegevens die gebruikt worden in het simulatiemodel dateren van maart 2007. Het is mogelijk dat deze niet meer volledig overeenkomen met de huidige situatie. Daarnaast simuleert het model slechts één sluis, terwijl in werkelijkheid nog twee kleinere sluisaanwezig zijn in de sluis in Diepenbeek. Tot slot bevat het model slechts één sluis, waardoor de impact op de aanliggende sluisen van eventuele maatregelen niet gemeten kan worden. Zo

kan het zijn dat een reductie van de wachttijden aan de sluis in Diepenbeek deels teniet gedaan wordt doordat de schepen langer moeten wachten aan de sluis van Hasselt of Genk. Dit simulatiemodel vormt daarom eerder een basis voor een model met meerdere sluis kamers en eventueel meerdere sluisen, waarin maatregelen om de wachttijden te reduceren voor de binnenvaart op het Albertkanaal realistisch getest kunnen worden.

Een eerste piste voor toekomstig onderzoek is dan ook een uitbreiding van het simulatiemodel dat ontworpen werd in deze masterthesis. Het toevoegen van een tweede (en derde) sluis kamer zou het realisme van het simulatiemodel sterk verhogen. Daarnaast kunnen eveneens meerdere sluisen worden toegevoegd aan het simulatiemodel. Op die manier kunnen synchronisatiestrategieën worden ontwikkeld die zorgen voor een efficiëntere werking van de sluisen in het Albertkanaal.

Daarnaast kan in toekomstig onderzoek een metamodel of artificiële neuraal netwerkmodel ontwikkeld worden om de wachttijden aan de sluisen langs het Albertkanaal in kaart te brengen.

LITERATUURLIJST

Bilbrey, J.K., & Schonfeld, P. (2009). The development of an online simulation model for managing inland waterway fleet. *International Journal of Management*, 26, 1, 115-126.

Campbell, J.F., Smith, L.D., Sweeney, D.C. II, Mundy, R., & Nauss, R.B. (2007). *Decision tools for reducing congestion at locks on the Upper Mississippi River*. Proceedings of the 40th Hawaii International Conference on System Sciences, Waikoloa (Hawaii), 3-6 januari, 2007.

Caris, A., Janssens, G.K., & Macharis, C. (2010). *A simulation methodology for the analysis of bundling networks in intermodal barge transport*. Proceedings of the European Simulation and Modelling Conference, Diepenbeek (Belgium), 25-27 oktober, 2010.

Confederatiebouw. (2011, maart). Bouwbedrijven kennen voordelen binnenvaart (nog) niet. *Bouwbedrijf*, 33-33.

Dai, M.D.M. (1993). *Delay estimation on congested waterways*. PhD thesis, University of Maryland, Maryland.

Dai, M.D.M., & Schonfeld, P. (1998). Metamodels for estimating waterway delays through series of queues. *Transportation Research Part B: Methodological*, 32(1), 1-19.

DeSalvo, J.S., & Lave, L.B. (1968). An analysis of towboat delays. *Journal of transport economics and policy*, 2(2), 232-241.

De Scheepvaart NV (2010). *NV de scheepvaart-jaarverslag 2009*. Opgevraagd op 17 november, 2010, via <http://www.descheepvaart.be/content.php?hmlID=9&smID=26>.

De Scheepvaart NV (z.d.). *Albertkanaal - sluizen*. Opgevraagd op 5 april, 2012, via <http://www.descheepvaart.be/Rubriek/Beroepsvaart/Kanalen/Albertkanaal.aspx>.

Federaal Planbureau (2009, februari). *Langetermijnvooruitzichten voor transport in België: referentiescenario*. Opgevraagd op 3 mei, 2011, via http://www.plan.be/press/press_det.php?lang=nl&TM=27&IS=67&KeyPub=812.

Flanders logistics (z.d.). *Vlaanderen als logistieke topregio voor heel Europa*. Opgevraagd op 20 mei, 2012, via <http://www.theflow.be/multimodaal-en-gateway-to-europe>.

Fredj, S.B., Oueslati-Boulahia, S, Roberts, J.W. (2001). *Measurement-based admission control for elastic traffic*. Proceedings of the International Teletraffic Conference 17, Salvador (Brazil), 17 december 2001.

Hillier, F.S., & Lieberman, G.J. (2010). *Introduction to operations research, ed. 9*. New York: Mc Graw-Hill.

Khisty, C.J., & Johnson, J.A. (1996). Traffic analysis of Chicago river and lock. *Transportation Research Record, 1522*, 94-101.

Kelton, W.D., Sadowski, R.P., & Swets, N.B. (2010). *Simulation with Arena, ed. 5*. New York: Mc Graw-Hill?

Kim, M.Y., & Schonfeld, P. (1995). Neural network estimation of waterway lock service times. *Transportation Research Record, 1497*, 36-43.

Luysterman, P. (2004, 5 mei). De containerbinnenvaart kan fileleed niet alleen aan. *De Tijd*. Opgevraagd op 17 november, 2010, via Mediargus database.

Martinelli, D., Dai, M.D.M., Schonfeld, P., & Antle, G. (1993). Methodology for planning efficient investments on inland waterways. *Transportation Research Record, 1383*, 49-57.

Martinelli, D., & Schonfeld, P. (1995). Approximating delays at interdependent locks. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 121(6)*, 300-307.

Mobiliteitsraad Vlaanderen (2009). *Het grote mobiliteitsrapport van Vlaanderen 2009*. Opgevraagd op 3 mei, 2011, via <http://www.serv.be/mora/page/mobiliteitsrapport-2009-0>.

Notteboom, T. (2007). Inland waterway transport of containerised cargo: from infancy to a fully-fledged transport mode. *Journal of Maritime Research*, 4(2), 63–80.

NV De Scheepvaart noteert sterke trafiekstijging in alle productgroepen. (2011, 4 maart). *De bouwchroniek*, 91 (9), 14-15.

Promotie Binnenvaart Vlaanderen (2007, 14 september) Ondernemer aan boord - Van zelf varen naar werken met personeel in de duw- en tankvaart - Het verhaal van Frank Rycquart. *Binnenvaart magazine voor vervoer over water*, 34, 7. Opgevraagd op 12 november, 2010 via http://www.binnenvaart.be/nl/nieuws/documents/Binnenvaart34_14-09-07.pdf.

Promotie Binnenvaart Vlaanderen (2012). *Trafiekcijfers en knelpunten 2011*. Opgevraagd op 23 mei, 2012, via <http://www.binnenvaart.be/documents/Trafiekcijfersenknelpunten2011final.pdf>.

Promotie Binnenvaart Vlaanderen (z.d.). *Steunmaatregelen*. Opgevraagd op 6 mei, 2011, via <http://www.binnenvaart.be/nl/steunprogrammas/steunprogrammas.asp>.

Provincie Antwerpen (2010). *As Albertkanaal*. Opgevraagd op 12 november, 2010, via http://www.provant.be/mobiliteit/haven/logant/provincie_antwerpen_/localisatie_benchmark_clusters_provant/as_albertkanaal/.

Raedts, M., Masui, C. (2007). *Van vraag tot tekst*. Leuven: Acco.

Smith, L.D., Sweeney, D.C. II, & Campbell J.F. (2009). Simulation of alternative approaches to relieving congestion at locks in a river transportation system. *Journal of the Operational Research Society*, 60(4), 519-533.

Theunissen, C., & Janssens, G.K. (2005). A 'Less-flexibility-first' Heuristic for the Placement of Inland Vessels in a Lock. *Transportation Planning and Technology*, 28,6, 427-446.

Ting, C. J., & Schonfeld, P. (1996). Effects of Tow Sequencing on Capacity and Delay at a Waterway Lock. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 122(1), 16-26.

Ting, C. J., & Schonfeld, P. (1998). Optimization Through Simulation of Waterway Transportation Investments. *Transportation Research Record*, 1620, 11-16.

Ting, C.J., & Schonfeld, P. (2001a). Efficiency versus fairness in priority control: waterway lock case. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 127(2), 82-88.

Ting, C.J., & Schonfeld, P. (2001b). Control alternatives at a waterway lock. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 127(2), 89-96.

Van de Walle, B., & De Mulder, T. (2008, maart). Hoe schepen veilig getijhoogteverschillen kunnen overbruggen: de zeesluis. *De Grote Rede* 21, 10-16.

Vandewalle, E. (2009, december). Binnentransport over Albertkanaal bespaart ons ontzettend veel fileleed. *Wijzers*. Opgevraagd op 17 november, 2010, via <http://www.wijzers.be/>.

Vlaams Parlement (2010). *Voorstel van resolutie betreffende de toekomst van de binnenvaart*. Stuk 581 (2009-2010) nr. 1 ingediend op 16 juni 2010. Opgevraagd op 30 april, 2011, via <http://docs.vlaamsparlement.be/docs/stukken/2009-2010/g581-3.pdf>.

Wang, S., & Schonfeld, P. (2002). *Development of generalized waterway simulation model for waterway operation*. Proceedings of the Annual Meeting of the Transportation Research Board 81, Washington (USA), 13-17 januari, 2002.

Wang, S., & Schonfeld, P. (2005). Scheduling interdependent waterway projects through simulation and genetic optimization. *Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering*, 131 (3), 89-97.

Wang, S., & Schonfeld, P. (2007). Demand elasticity and benefit measurement in a waterway simulation model. *Transportation Research Record*, 3033, 53-61.

Waterwegen en Zeekanaal NV (z.d.). *Troeven van de binnenvaart*. Opgevraagd op 12 november, 2010, via http://www.wenz.be/Transport_en_Logistiek/Waterwegtransport/Troeven_vd_binnenvaart.html.

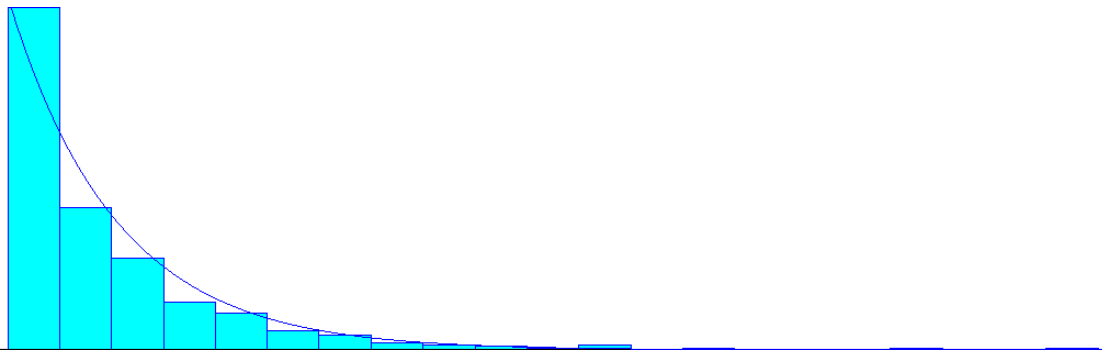
Wilson, W.W. (2006). Vessel, firm and lock efficiency measures in lock performance. *Transportation Research Record*, 1963, 1-8.

Zhu, L., Schonfeld, P., Kim, Y.M., Flood, I., & Ting, C.J. (1999). Queuing network analysis for waterways with artificial neural networks. *Artificial intelligence for engineering, design, analysis and manufacturing*, 13, 365-375.

BIJLAGEN

Analyse aankomsttijden

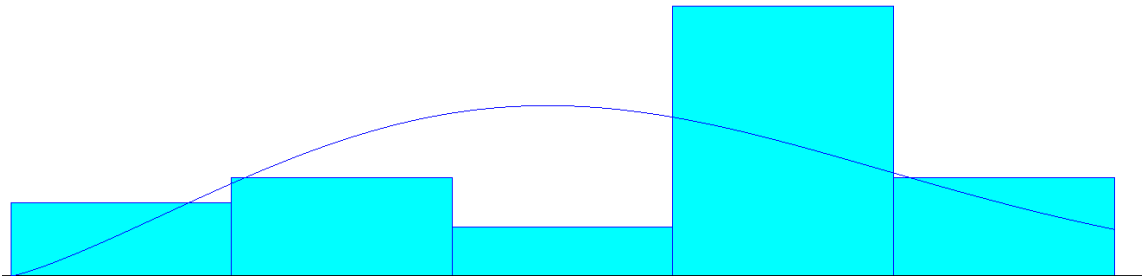
Bijlage 1: Histogram tussenaankomsttijden schepen stroomafwaarts



Bijlage 2: Samenvatting gegevens, kansverdeling en Chi kwadraat test van tussenaankomsttijden stroomafwaarts

<i>Data Summary</i>	<i>Chi Square Test</i>
Number of Data Points = 776	Number of intervals = 9
Min Data Value = 0	Degrees of freedom = 7
Max Data Value = 7.75	Test Statistic = 43.5
<i>Distribution Summary</i>	Corresponding p-value < 0.005
Distribution: Exponential	
Expression: $-0.001 + \text{EXPO}(0.616)$	
Square Error: 0.010294	

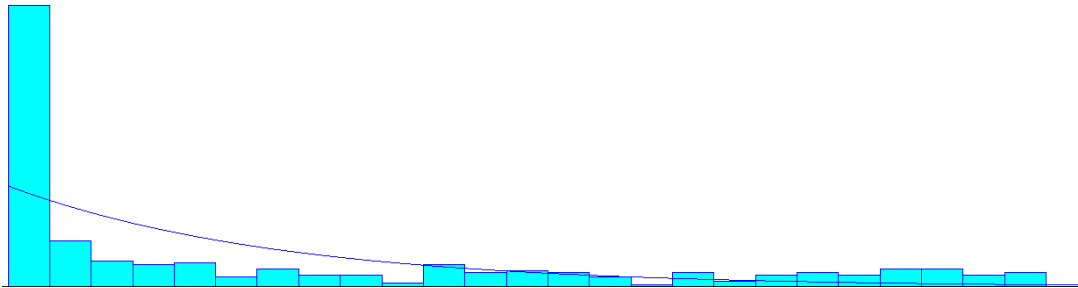
Bijlage 3: Histogram aankomsttijden stroomopwaarts 2 maart 2007 met Weibull verdeling (WEIB(14, 2.22))



Bijlage 4: Samenvatting gegevens en Chi kwadraat test aankomsttijden stroomafwaarts 2 maart 2007 o.b.v. WEIB(14, 2.22)

<i>Data Summary</i>	<i>Chi Square Test</i>
Number of Data Points = 24	Number of intervals = 3
Min Data Value = 2.11	Degrees of freedom = 0
Max Data Value = 23.5	Test Statistic = 14.3
	Corresponding p-value < 0.005
Distribution: Weibull	
Expression: WEIB(14, 2.22)	
Square Error: 0.102266	

Bijlage 5: Histogram spreiding aankomsttijden groepjes stroomopwaarts met exponentiële verdeling



Bijlage 6: Samenvatting gegevens en Chi kwadraat test aankomsttijden stroomafwaarts van 2 maart 2007 o.b.v. exponentiële verdeling

<i>Data Summary</i>	<i>Chi Square Test</i>
Number of Data Points = 325	Number of intervals = 15
Min Data Value = 0.000694	Degrees of freedom = 13
Max Data Value = 0.499	Test Statistic = 450
	Corresponding p-value < 0.005
Distribution: Exponential	
Expression: $1e-005 + \text{EXPO}(0.133)$	
Square Error: 0.100971	

Sensitiviteitsanalyse

Bijlage 7: Berekening gepaard t-interval basisscenario en scenario A van gemiddelde wachttijden van schepen stroomafwaarts

	X _{1j} (Gem. wachttijd basisscenario AW)	X _{2j} (Gem. wachttijd scenario A AW)	Z _j	$[Z_j - \bar{Z}_{(n)}]^2$
replicatie 1	0,2663	0,1703	0,096	0,00013666
replicatie 2	0,1538	0,2314	-0,0776	0,02621485
replicatie 3	0,3151	0,2612	0,0539	0,00092477
replicatie 4	0,2896	0,2596	0,03	0,00294958
replicatie 5	0,4357	0,2376	0,1981	0,01294816
replicatie 6	0,3012	0,2655	0,0357	0,00236293
replicatie 7	0,2517	0,2116	0,0401	0,00195452
replicatie 8	0,2524	0,2159	0,0365	0,0022858
replicatie 9	0,3386	0,2643	0,0743	0,0001002
replicatie 10	0,2758	0,2545	0,0213	0,00397026
replicatie 11	0,2226	0,1758	0,0468	0,001407
replicatie 12	0,5614	0,2828	0,2786	0,0377486
replicatie 13	0,1891	0,1487	0,0404	0,00192809
replicatie 14	0,2065	0,1529	0,0536	0,0009431
replicatie 15	0,4024	0,2637	0,1387	0,00295827
replicatie 16	0,2821	0,2156	0,0665	0,0003172
replicatie 17	0,2836	0,1321	0,1515	0,0045145
replicatie 18	0,3354	0,2888	0,0466	0,00142204
replicatie 19	0,3269	0,2796	0,0473	0,00136974
replicatie 20	0,4904	0,1825	0,3079	0,04999249

Bijlage 8: Berekening gepaard t-interval basisscenario en scenario B van gemiddelde wachttijden van schepen stroomopwaarts

	X_{1j} (Gem. wachttijd basisscenario OW)	X_{2j} (Gem. wachttijd scenario B OW)	Z_j	$[Z_j - \bar{Z}_{(n)}]^2$
replicatie 1	0,2663	0,6569	-0,3906	0,022302436
replicatie 2	0,1538	0,2663	-0,1125	0,016579138
replicatie 3	0,3151	0,7495	-0,4344	0,03730306
replicatie 4	0,2896	0,5198	-0,2302	0,000122324
replicatie 5	0,4357	0,8347	-0,399	0,024881908
replicatie 6	0,3012	0,5791	-0,2779	0,00134249
replicatie 7	0,2517	0,403	-0,1513	0,008092802
replicatie 8	0,2524	0,5066	-0,2542	0,000167444
replicatie 9	0,3386	0,5548	-0,2162	0,000628004
replicatie 10	0,2758	0,5887	-0,3129	0,00513229
replicatie 11	0,2226	0,4037	-0,1811	0,003619226
replicatie 12	0,5614	0,5614	0	0,058206388
replicatie 13	0,1891	0,3811	-0,192	0,002426548
replicatie 14	0,2065	0,7641	-0,5576	0,100070996
replicatie 15	0,4024	0,7224	-0,32	0,006199988
replicatie 16	0,2821	0,4724	-0,1903	0,002596922
replicatie 17	0,2836	0,3976	-0,114	0,016195108
replicatie 18	0,3354	0,5487	-0,2133	0,000781762
replicatie 19	0,3269	0,5628	-0,2359	2,87E-05
replicatie 20	0,4904	0,5322	-0,0418	0,039784292

Bijlage 9: Berekening gepaard t-interval basisscenario en scenario B van gemiddelde wachttijden van schepen stroomafwaarts

	X_{1j} (Gem. wachttijd basisscenario AW)	X_{2j} (Gem. wachttijd scenario B AW)	Z_j	$[Z_j - \bar{Z}_{(n)}]^2$
replicatie 1	0,3046	0,6168	-0,3122	0,010476546
replicatie 2	0,1776	0,3968	-0,2192	8,75E-05
replicatie 3	0,4523	0,8048	-0,3525	0,020350449
replicatie 4	0,3203	0,3611	-0,0408	0,028576212
replicatie 5	0,4852	0,5363	-0,0511	0,025199975
replicatie 6	0,3557	0,5112	-0,1555	0,002953379
replicatie 7	0,3833	0,5222	-0,1389	0,005033193
replicatie 8	0,429	0,7818	-0,3528	0,020436132
replicatie 9	0,2936	0,6694	-0,3758	0,027541062
replicatie 10	0,4383	0,5143	-0,076	0,017914484
replicatie 11	0,2636	0,5999	-0,3363	0,015990867
replicatie 12	0,3097	0,3205	-0,0108	0,039618912
replicatie 13	0,4084	0,7806	-0,3722	0,026359146
replicatie 14	0,2658	0,5216	-0,2558	0,002111862
replicatie 15	0,3947	0,7613	-0,3666	0,02457213
replicatie 16	0,3659	0,7783	-0,4124	0,041028528
replicatie 17	0,3441	0,4585	-0,1144	0,009109748
replicatie 18	0,4754	0,4415	0,0339	0,059411625
replicatie 19	0,2862	0,5192	-0,233	5,36E-04
replicatie 20	0,5412	0,5957	-0,0545	0,024132069

Bijlage 10: Berekening gepaard t-interval basisscenario en alternatief scenario (bedieningstijd: TRIA (14,16,18)) van gemiddelde wachttijden van schepen stroomopwaarts

	X_{1j} (Gem. wachttijd basisscenario OW)	X_{2j} (Gem. wachttijd altern. scenario OW)	Z_j	$[Z_j - \bar{Z}_{(n)}]^2$
replicatie 1	0,2663	0,2631	0,0032	7,47E-05
replicatie 2	0,1538	0,1379	0,0159	1,64E-05
replicatie 3	0,3151	0,305	0,0101	3,05E-06
replicatie 4	0,2896	0,2627	0,0269	0,000226653
replicatie 5	0,4357	0,4062	0,0295	0,000311699
replicatie 6	0,3012	0,459	-0,1578	0,028779426
replicatie 7	0,2517	0,2485	0,0032	7,47E-05
replicatie 8	0,2524	0,2482	0,0042	5,84E-05
replicatie 9	0,3386	0,332	0,0066	2,75E-05
replicatie 10	0,2758	0,274	0,0018	0,000100902
replicatie 11	0,2226	0,2933	-0,0707	0,006813677
replicatie 12	0,5614	0,428	0,1334	0,014775618
replicatie 13	0,1891	0,1731	0,016	1,73E-05
replicatie 14	0,2065	0,2861	-0,0796	0,008362188
replicatie 15	0,4024	0,3629	0,0395	0,000764799
replicatie 16	0,2821	0,2753	0,0068	2,55E-05
replicatie 17	0,2836	0,2756	0,008	1,48E-05
replicatie 18	0,3354	0,3275	0,0079	1,56E-05
replicatie 19	0,3269	0,3172	0,0097	4,60E-06
replicatie 20	0,4904	0,2681	0,2223	0,044291307

Bijlage 11: Berekening gepaard t-interval basisscenario en alternatief scenario (bedieningstijd: TRIA (14,16,18)) van gemiddelde wachttijden van schepen stroomafwaarts

	X_{1j} (Gem. wachttijd basisscenario AW)	X_{2j} (Gem. wachttijd altern. scenario AW)	Z_j	$[Z_j - \bar{Z}_{(n)}]^2$
replicatie 1	0,3046	0,3434	-0,0388	2,22E-03
replicatie 2	0,1776	0,1176	0,06	2,67E-03
replicatie 3	0,4523	0,4034	0,0489	1,64E-03
replicatie 4	0,3203	0,294	0,0263	0,000322023
replicatie 5	0,4852	0,3877	0,0975	0,007946831
replicatie 6	0,3557	0,343	0,0127	1,89E-05
replicatie 7	0,3833	0,3779	0,0054	8,73E-06
replicatie 8	0,429	0,4239	0,0051	1,06E-05
replicatie 9	0,2936	0,2819	0,0117	1,12E-05
replicatie 10	0,4383	0,4149	0,0234	0,000226352
replicatie 11	0,2636	0,341	-0,0774	0,00735392
replicatie 12	0,3097	0,3205	-0,0108	0,000366914
replicatie 13	0,4084	0,4041	0,0043	1,64E-05
replicatie 14	0,2658	0,2608	0,005	1,13E-05
replicatie 15	0,3947	0,4251	-0,0304	0,00150195
replicatie 16	0,3659	0,3522	0,0137	2,86E-05
replicatie 17	0,3441	0,3596	-0,0155	5,69E-04
replicatie 18	0,4754	0,4729	0,0025	3,43E-05
replicatie 19	0,2862	0,2824	0,0038	2,07E-05
replicatie 20	0,5412	0,5215	0,0197	0,000128709

Bijlage 12: Berekening gepaard t-interval basisscenario en alternatief scenario (bedieningstijd: TRIA (12,14,16)) van gemiddelde wachttijd van schepen stroomopwaarts

	X_{1j} (Gem. wachttijd basisscenario OW)	X_{2j} (Gem. wachttijd altern. scenario OW)	Z_j	$[Z_j - \bar{Z}_{(n)}]^2$
replicatie 1	0,2663	0,2533	0,013	5,87E-04
replicatie 2	0,1538	0,1808	-0,027	4,13E-03
replicatie 3	0,3151	0,2378	0,0773	1,61E-03
replicatie 4	0,2896	0,2305	0,0591	0,000478078
replicatie 5	0,4357	0,269	0,1667	0,016761186
replicatie 6	0,3012	0,4293	-0,1281	2,73E-02
replicatie 7	0,2517	0,2156	0,0361	1,29E-06
replicatie 8	0,2524	0,33	-0,0776	1,32E-02
replicatie 9	0,3386	0,3168	0,0218	2,38E-04
replicatie 10	0,2758	0,2686	0,0072	0,000902101
replicatie 11	0,2226	0,2764	-0,0538	0,008287371
replicatie 12	0,5614	0,403	0,1584	0,014680957
replicatie 13	0,1891	0,17	0,0191	3,29E-04
replicatie 14	0,2065	0,203	0,0035	1,14E-03
replicatie 15	0,4024	0,3432	0,0592	0,000482461
replicatie 16	0,2821	0,2629	0,0192	3,25E-04
replicatie 17	0,2836	0,2169	0,0667	8,68E-04
replicatie 18	0,3354	0,2677	0,0677	9,28E-04
replicatie 19	0,3269	0,2694	0,0575	4,11E-04
replicatie 20	0,4904	0,2917	0,1987	0,026070946

Bijlage 13: Berekening gepaard t-interval basisscenario en alternatief scenario (bedieningstijd: TRIA (12,14,16)) van gemiddelde wachttijd van schepen stroomafwaarts

	X_{1j} (Gem. wachttijd basisscenario AW)	X_{2j} (Gem. wachttijd altern. scenario AW)	Z_j	$[Z_j - \bar{Z}_{(n)}]^2$
replicatie 1	0,3046	0,3373	-0,0327	9,23E-03
replicatie 2	0,1776	0,0991	0,0785	2,30E-04
replicatie 3	0,4523	0,3224	0,1299	4,43E-03
replicatie 4	0,3203	0,2483	0,072	7,48225E-05
replicatie 5	0,4852	0,3052	0,18	0,013607223
replicatie 6	0,3557	0,3148	0,0409	5,04E-04
replicatie 7	0,3833	0,3081	0,0752	1,40E-04
replicatie 8	0,429	0,2811	0,1479	7,15E-03
replicatie 9	0,2936	0,2765	0,0171	2,14E-03
replicatie 10	0,4383	0,402	0,0363	0,000731703
replicatie 11	0,2636	0,322	-0,0584	0,014823063
replicatie 12	0,3097	0,3205	-0,0108	0,005498223
replicatie 13	0,4084	0,2793	0,1291	4,32E-03
replicatie 14	0,2658	0,2106	0,0552	6,64E-05
replicatie 15	0,3947	0,4089	-0,0142	0,006014003
replicatie 16	0,3659	0,3464	0,0195	1,92E-03
replicatie 17	0,3441	0,3321	0,012	2,64E-03
replicatie 18	0,4754	0,2996	0,1758	1,26E-02
replicatie 19	0,2862	0,2647	0,0215	1,75E-03
replicatie 20	0,5412	0,349	0,1922	0,016602323

Bijlage 14: Berekening gepaard t-interval basisscenario en alternatief scenario (bedieningstijd: TRIA (14,16,18)) van gemiddelde systeemtijd van schepen stroomopwaarts

	X1j (Gem. systeemtijd basisscenario OW)	X2j (Gem. systeemtijd altern. scenario OW)	Z_j	$[Z_j - \bar{Z}_{(n)}]^2$
replicatie 1	0,5682	0,5316	0,0366	2,99E-04
replicatie 2	0,4589	0,4096	0,0493	2,10E-05
replicatie 3	0,6169	0,5686	0,0483	3,12E-05
replicatie 4	0,5896	0,5293	0,0603	4,12E-05
replicatie 5	0,7314	0,669	0,0624	7,25E-05
replicatie 6	0,7757	0,7269	0,0488	2,59E-05
replicatie 7	0,5557	0,5192	0,0365	3,02E-04
replicatie 8	0,5524	0,5149	0,0375	2,68E-04
replicatie 9	0,629	0,5891	0,0399	1,96E-04
replicatie 10	0,5781	0,5419	0,0362	0,000312759
replicatie 11	0,5219	0,5573	-0,0354	0,007971811
replicatie 12	0,8641	0,6964	0,1677	0,012953854
replicatie 13	0,4904	0,441	0,0494	2,01E-05
replicatie 14	0,5053	0,5575	-0,0522	1,13E-02
replicatie 15	0,6994	0,6288	0,0706	0,000279391
replicatie 16	0,5853	0,5451	0,0402	1,87E-04
replicatie 17	0,5846	0,5432	0,0414	1,56E-04
replicatie 18	0,6407	0,5995	0,0412	1,61E-04
replicatie 19	0,6341	0,5911	0,043	1,18E-04
replicatie 20	0,7892	0,5332	0,256	0,040850473

Bijlage 15: Berekening gepaard t-interval basisscenario en alternatief scenario (bedieningstijd: TRIA (14,16,18)) van gemiddelde systeemtijd van schepen stroomafwaarts

	X1j (Gem. systeemtijd basisscenario AW)	X2j (Gem. systeemtijd altern. scenario AW)	Z_j	$[Z_j - \bar{Z}_{(n)}]^2$
replicatie 1	0,6063	0,6128	-0,0065	2,26E-03
replicatie 2	0,4789	0,3846	0,0943	2,84E-03
replicatie 3	0,7502	0,6691	0,0811	1,61E-03
replicatie 4	0,6231	0,5635	0,0596	3,46E-04
replicatie 5	0,7843	0,6543	0,13	7,92E-03
replicatie 6	0,6639	0,6179	0,046	2,51E-05
replicatie 7	0,6867	0,648	0,0387	5,24E-06
replicatie 8	0,738	0,6995	0,0385	6,20E-06
replicatie 9	0,5933	0,5484	0,0449	1,53E-05
replicatie 10	0,728	0,6847	0,0433	5,34E-06
replicatie 11	0,563	0,6093	-0,0463	0,007619544
replicatie 12	0,6116	0,5925	0,0191	0,000479172
replicatie 13	0,719	0,6785	0,0405	2,40E-07
replicatie 14	0,5689	0,5279	0,041	1,00E-10
replicatie 15	0,6895	0,684	0,0055	0,00125954
replicatie 16	0,6632	0,6168	0,0464	2,93E-05
replicatie 17	0,6515	0,6335	0,018	5,29E-04
replicatie 18	0,7775	0,7416	0,0359	2,59E-05
replicatie 19	0,5809	0,5439	0,037	1,59E-05
replicatie 20	0,8377	0,7849	0,0528	0,000139476

Auteursrechtelijke overeenkomst

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

Modellering van wachttijden in de binnenvaart

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,

Pollaris, Hanne

Datum: **1/06/2012**