

2013•2014  
FACULTEIT BEDRIJFSECONOMISCHE WETENSCHAPPEN  
*master in de toegepaste economische wetenschappen:  
handelsingenieur*

Masterproef  
Modelleren van wachttijden aan opeenvolgende sluizen

Promotor :  
dr. Katrien RAMAEKERS

Copromotor :  
Mevrouw Hanne POLLARIS

Joris Segers  
*Proefschrift ingediend tot het behalen van de graad van master in de toegepaste  
economische wetenschappen: handelsingenieur*

2013•2014

FACULTEIT BEDRIJFSECONOMISCHE  
WETENSCHAPPEN

*master in de toegepaste economische wetenschappen:  
handelsingenieur*

Masterproef

Modelleren van wachttijden aan opeenvolgende sluizen

Promotor :  
dr. Katrien RAMAEKERS

Copromotor :  
Mevrouw Hanne POLLARIS

Joris Segers

*Proefschrift ingediend tot het behalen van de graad van master in de toegepaste  
economische wetenschappen: handelsingenieur*



## **WOORD VOORAF**

Als laatstejaars Handelsingenieur in de afstudeerrichting Operationeel Management en Logistiek met minor Finance, is deze masterproef met als onderwerp 'Modelleren van wachttijden aan opeenvolgende sluizen' de afsluiter van mijn studentencarrière. Mijn interesse in het onderwerp is grotendeels te wijten aan het feit dat mijn vader reeds mijn hele leven werkt op het sluizencomplex te Genk. Hierdoor kreeg ik van jongs af aan informatie mee over de werking van de sluizen op het Albertkanaal en heb ik bovendien kansen gekregen om dit visueel van dichtbij te leren kennen. Een onderzoek in dit onderwerp is daardoor een logisch gevolg.

In de eerste plaats wil ik mijn promotor Dr. Katrien Ramaekers en mijn copromotor mevrouw Hanne Pollaris bedanken voor hun begeleiding, advies en feedback bij het schrijven van deze masterproef. Als tweede wil ik graag NV De Scheepvaart bedanken voor het beschikbaren stellen van de nodige data. Verder wil ik graag mijn ouders bedanken voor de gekregen mogelijkheid om de studies van Handelsingenieur tot een goed einde te brengen. In de vierde plaats wil ik mijn collega's van Junior Consulting en bovendien Prof. Dr. Ghislain Houben bedanken om mijn masteropleiding af te sluiten in de aanwezigheid van ondernemerschap. Tenslotte wil ik mijn vriendin en beste vriend bedanken voor de steun in het succesvol afronden van zowel deze thesis als mijn studies.



## **SAMENVATTING**

Het laatste decennium blijft het waterverkeer aan vele sluizen stijgen. Om een vlot goederenverkeer te behouden is een efficiënte doorgang op de waterwegen nodig. Het tweerichtingsverkeer en de afhankelijkheid tussen sluizen compliceert de werking van het systeem. Vanzelfsprekend is daarom nood naar onderzoek voor het modelleren en reduceren van wachttijden en afhankelijkheid aan sluizen. Dit is bijgevolg de centrale onderzoeksvraag van deze masterproef. Hiernaast zijn acht deelvragen opgesteld. In het tweede hoofdstuk wordt een literatuurstudie uitgevoerd die een antwoord op de eerste vijf deelvragen geeft. De overige drie worden beantwoord in het derde hoofdstuk, de praktijkstudie. Hierin wordt onder andere een simulatiemodel opgesteld van de sluzencomplexen van Wijnegem, Olen en Ham. Vervolgens wordt op dit model een sensitiviteitsanalyse uitgevoerd.

Eerst wordt in de literatuurstudie de werking van een sluis besproken, een korte bespreking van het Albertkanaal en zijn sluizen, de capaciteit, de geldende prioriteitsregels en de soorten versassingen die kunnen plaatsvinden. In de tweede sectie van de literatuurstudie wordt onderzocht welke factoren een invloed hebben op de wachttijden aan sluizen. Omdat wachtrijen ontstaan wanneer het aanbod aan een sluis kleiner is dan de vraag gedurende een korte periode, wordt onderscheid gemaakt tussen factoren die invloed uitoefenen op het aanbod en factoren die invloed hebben op de vraag. Het aanbod wordt bepaald door de tijd die nodig is om een schip te versassen, dit is grotendeels de bedieningstijd. De vraag is het aantal schepen dat de sluis wil passeren tijdens een gegeven tijdsperiode. Factoren die een invloed hebben op de aanbodzijde zijn onder andere de sluisinfrastructuur, de prioriteitsregels en het type versassing. De vraagzijde wordt onder andere beïnvloed door de economische groei, alternatieve transportmodi en de afhankelijkheid van sluizen.

De derde sectie behandelt de afhankelijkheid van sluizen. De belangrijkste factoren die een invloed uitoefenen op de afhankelijkheid zijn de afstand tussen de twee sluizen, de gevaren snelheid, de infrastructuur, de prioriteitsregels en de benuttingsgraad. Hoe langer de afstand, hoe minder afhankelijkheid aanwezig is. De gevaren snelheid is intuïtief duidelijk. Wanneer schepen allemaal aan eenzelfde snelheid varen, komen ze aan hetzelfde ritme aan als waarin ze zijn vertrokken aan de voorgaande sluis. De infrastructuur bepaalt de mogelijkheden voor schepen om elkaar voorbij te steken. Prioriteitsregels bepalen de volgorde van versassing. Onder First In First Out zullen de schepen die eerst aankomen eerst worden versast. Bij Shortest Processing First wordt een willekeurigheid in het aankomstenritme geïntroduceerd, zodat afhankelijkheid mogelijk afneemt tussen opeenvolgende sluizen. Voor de benutting wordt onderscheid gemaakt tussen de kritieke en relatieve benutting. De kritieke benutting is de verhouding van de maximale trafiek dat een sluis passeert tot de sluiscapaciteit. De relatieve benutting is de verhouding van de benutting van een sluis tot de benutting van de sluis met de hoogste kritieke benutting. Deze verhouding toont de

mate waarin de vertragingen aan een sluis worden gedomineerd door de vertragingen aan de kritieke sluis.

De vierde sectie bespreekt de oplossingen voor een reductie in wachttijden en afhankelijkheid. Een eerste mogelijke oplossing in wachttijden het inzetten van hulpbootjes. Deze bootjes helpen bij het navigeren naar de sluiskamer. Een tweede oplossing is het invoeren van alternatieve prioriteitsregels. Wanneer van een First In First Out naar een Shortest Processing First wordt overgeschakeld, brengt dit lagere wachttijden met zich mee. Omdat deze regel oneerlijkheid introduceert, bestaat het Fairer Shortest Processing First. Deze prioriteitsregel werkt volgens de SPF regel maar limiteert voorrang om een eerlijkheid te behouden. De wetenschappelijke literatuur biedt minder duidelijke oplossingen voor een reductie in afhankelijkheid. De sluisbenutting is één van de factoren die een invloed heeft op de afhankelijkheid. Uit de literatuur is geweten dat wanneer de kritieke benutting toeneemt, de afhankelijkheid toeneemt. Een daling in kritieke benutting kan gerealiseerd worden door een verhoging in de sluiscapaciteit. Deze daling brengt dan normaliter een reductie in afhankelijkheid met zich mee. Een derde mogelijke verbetering is een daling in de wachttijd op een volgend schip vooraleer te versassen. Wanneer langer wordt gewacht, verdwijnt normaliter meer spreiding tussen schepen, d.w.z. afhankelijkere aankomsten.

De laatste sectie behandelt de verschillende methodes voor het modelleren van wachttijden aan opeenvolgende sluisen. Uit de wetenschappelijke literatuur komen vier verschillende methodes naar voor. De eerste methode is de wachtrijtheorie. Met behulp van deze methode kan op basis van assumpties en benaderingen een eenvoudig model worden opgesteld over hoe een systeem zou kunnen werken. Deze methode geeft echter slechts een ruwe schatting en houdt bovendien geen rekening met afhankelijkheid. Simulatiemodellen zijn modellen die op een gedetailleerde manier een bestaand systeem nabootsen. Ze geven resultaten met een hoge juistheid, maar het vergt meer tijd om deze resultaten te bekomen. Wanneer de resultaten sneller nodig zijn en de juistheid van de resultaten nog steeds belangrijk is, is een metamodel beter. Dit zijn modellen die worden opgesteld vanuit gesimuleerde data. Het voordeel van een metamodel is dat het een veel kortere tijd dan een simulatiemodel nodig heeft om tot resultaten te komen. Een vierde methode voor het modelleren van wachttijden is het kunstmatige neurale netwerk. Wanneer een te modelleren netwerk complexer is, is deze methode een betere keuze dan een metamodel.

De praktijkstudie bestaat uit twee delen. Eerst wordt een analyse uitgevoerd op de beschikbare data. De data betreft het waterverkeer van maart 2013 aan de sluis van Wijnegem, Olen en Ham. Uit deze analyse blijkt dat de tussenaankomsttijden aan Wijnegem stroomopwaarts en Ham stroomafwaarts niet kunnen worden benaderd door een kansverdeling. Verder is uit de aankomsten te herkennen dat schepen in groepen aankomen. We veronderstellen dat de aankomsten daarom afhankelijk zijn. Voor zowel de analyse van de aankomsttijden, de schipafmetingen en de bedieningstijden werd aan de hand van de Input Analyzer van Arena geen statistische verdeling gevonden. In het simulatiemodel worden daarom de geobserveerde tijden ingelezen. Uit de analyse van de vaartijden blijkt dat de schipgrootte niet gerelateerd is aan de vaartijd. Bovendien kunnen

de verschillende vaartijden significant worden benaderd door kansverdelingen. Deze kansverdelingen worden daarom toegepast in het simulatiemodel.

Het simulatiemodel vormt het tweede deel van de praktijkstudie. Op het basismodel worden enkele veranderingen doorgevoerd. De eerste aanpassing aan het model zijn onafhankelijke aankomsten als de invoer voor het model. De resultaten wijzen uit dat de aankomsten aan de volgende sluizen afhankelijk blijven. Voor een mogelijke reductie in wachttijd en afhankelijkheid te onderzoeken werden twee van de uit de literatuurstudie voorgestelde oplossingen geïmplementeerd. De eerste is het verlagen van de kritieke benutting door de sluiscapaciteit te verhogen. De resultaten laten zien dat de doorgevoerde verhoging in capaciteit geen onafhankelijkheid introduceert. De tweede verandering is de wachttijd op een volgend schip vooraleer te starten met een versassing. De resultaten wijzen op een interessante conclusie: wanneer slechts tien minuten op een volgend schip wordt gewacht, gaat zowel de afhankelijkheid als de wachttijd op een positieve en significante manier veranderen.





## INHOUDSOPGAVE

Woord vooraf .....	i
Samenvatting.....	iii
Inhoudsopgave.....	vii
Lijst van figuren.....	xi
Lijst van tabellen .....	xiii
Hoofdstuk 1: Probleemstelling.....	- 1 -
1.1    Praktijkprobleem.....	- 1 -
1.2    Onderzoeksvragen .....	- 3 -
1.3    Methodologie.....	- 4 -
Hoofdstuk 2: Literatuurstudie.....	- 7 -
2.1    Inleiding.....	- 7 -
2.1.1    Het principe van een sluis .....	- 7 -
2.1.2    Het Albertkanaal .....	- 9 -
2.1.3    Capaciteit .....	- 11 -
2.1.4    Prioriteitsregels.....	- 12 -
2.1.5    Soorten versassing .....	- 14 -
2.2    Factoren die de wachttijden aan opeenvolgende sluizen beïnvloeden.....	- 15 -
2.3    Afhankelijkheid van sluizen.....	- 18 -
2.4    Oplossingen om wachttijden en afhankelijkheid te reduceren.....	- 21 -
2.4.1    Wachttijden.....	- 22 -

2.4.2	Afhankelijkheid .....	- 22 -
2.5	Modellering van wachttijden aan afhankelijke sluisen .....	- 23 -
2.5.1	Wachtrijmodellen .....	- 23 -
2.5.2	Simulatiemodellen .....	- 24 -
2.5.3	Metamodellen .....	- 26 -
2.5.4	Kunstmatige Neurale Netwerkmodellen .....	- 27 -
2.5.5	Bespreking .....	- 28 -
Hoofdstuk 3: Praktijkstudie.....		- 29 -
3.1	Inleiding.....	- 29 -
3.2	Analyse van de data .....	- 29 -
3.2.1	Algemeen.....	- 29 -
3.2.2	Aankomsttijden.....	- 30 -
3.2.3	Tussenaankomsttijden.....	- 33 -
3.2.4	Tussenaankomsten van groepen .....	- 35 -
3.2.5	Analyse per dag .....	- 36 -
3.2.6	Analyse van schipafmetingen.....	- 38 -
3.2.7	Bedieningstijden.....	- 39 -
3.2.8	Vaartijden tussen twee sluisen.....	- 40 -
3.2.9	Analyse duwvaartsluis.....	- 43 -
3.3	Simulatiemodel.....	- 44 -
3.3.1	Inleiding .....	- 44 -

3.3.2	Elementen van het simulatiemodel .....	- 44 -
3.3.3	Assumpties .....	- 46 -
3.3.4	Beschrijving simulatiemodel .....	- 48 -
3.3.5	Replicatieparameters .....	- 54 -
3.3.6	Prestatiemaatstaven .....	- 55 -
3.4	Validatie .....	- 55 -
3.5	Bespreking simulatieresultaten .....	- 57 -
3.5.1	Algemeen.....	- 57 -
3.5.2	Afhankelijkheid .....	- 58 -
3.5.3	Systeemtijden .....	- 60 -
3.5.4	Conclusie .....	- 61 -
3.6	Onafhankelijke aankomsten.....	- 61 -
3.6.1	Beschrijving .....	- 62 -
3.6.2	Resultaten.....	- 62 -
3.6.3	Conclusie .....	- 63 -
3.7	Sensitiviteitsanalyse .....	- 63 -
3.7.1	Kritieke benutting.....	- 63 -
3.7.2	Maximale wachttijd op een volgend schip .....	- 64 -
Hoofdstuk 4: Conclusies .....		- 71 -
4.1	Uit wetenschappelijk onderzoek.....	- 71 -
4.2	Uit praktijkonderzoek .....	- 72 -

4.3	Beperkingen van het simulatiemodel .....	- 74 -
4.4	Toekomstig onderzoek .....	- 75 -
	Referentielijst.....	xv
	Bijlagen.....	xix
	Tussenaankomsten .....	xix
	Aankomsten per dag .....	xxi
	Afmetingen van schepen .....	xxvi
	Vaartijden tussen twee sluizen .....	xxvii
	Enkel duwvaartsluis .....	xxxiii
	Basismodel .....	xxxvi
	Onafhankelijke aankomsten.....	xl
	Sensitiviteitsanalyse maximale wachttijd op een volgend schip .....	xliv
	Gepaarde t-test gemiddelde wachttijden basisscenario versus scenario A.....	xliv
	Gepaarde t-test gemiddelde wachttijden basisscenario versus scenario B.....	l
	Gepaarde t-test maximale wachttijden basisscenario versus scenario C .....	lvi

## LIJST VAN FIGUREN

<i>Figuur 1: Serieel opeenvolgende sluizen (Bron: Dai &amp; Schonfeld, 1998, eigen bewerking)</i> .....	- 2 -
<i>Figuur 2: Versassen door een sluis (Bron: Deurganckdoksuis, 2009, eigen bewerking)</i> .....	- 8 -
<i>Figuur 3: De Vlaamse waterwegen onderverdeeld volgens waterwegbeheerder (Bron: Binnenvaart, 2008, eigen bewerking)</i> .....	- 9 -
<i>Figuur 4: Albertkanaal in detail (Bron: Promotie Binnenvaart Vlaanderen, 2008)</i> .....	- 21 -
<i>Figuur 5: Tweerichtingsverkeer sluizen</i> .....	- 21 -
<i>Figuur 6: Histogram aankomsttijden Ham stroomafwaarts (richting Wijnegem)</i> .....	- 31 -
<i>Figuur 7: Histogram aankomsttijden Wijnegem stroomopwaarts (richting Ham)</i> .....	- 32 -
<i>Figuur 8: Histogram tussenaankomsttijden Ham stroomafwaarts</i> .....	- 34 -
<i>Figuur 9: Histogram tussenaankomsttijden van groepen, Ham stroomafwaarts</i> .....	- 35 -
<i>Figuur 10: Histogram tussenaankomsten op woensdag 6 maart 2013, Ham stroomafwaarts</i> .....	- 36 -
<i>Figuur 11: Histogram afmetingen schepen, Ham stroomafwaarts</i> .....	- 38 -
<i>Figuur 12: Histogram bedieningstijden, Wijnegem stroomopwaarts</i> .....	- 40 -
<i>Figuur 13: Histogram vaartijden 1 maart t.e.m. 4 maart, Ham – Olen stroomafwaarts</i> .....	- 42 -
<i>Figuur 14: Aankomstengedeelte Wijnegem</i> .....	- 49 -
<i>Figuur 15: Aanschuiven en toewijzen aan sluiskamer</i> .....	- 51 -
<i>Figuur 16: Versassingsproces</i> .....	- 52 -
<i>Figuur 17: Aankomsten Olen stroomopwaarts</i> .....	- 53 -
<i>Figuur 18: Verlaten van systeem via Ham</i> .....	- 54 -
<i>Figuur 19: Gemiddeld aantal versassingen per sluis en vaarrichting, per replicatie</i> .....	- 58 -
<i>Figuur 20: Gemiddelde groepsgrootte per versassing, per sluis en stroomrichting, per replicatie</i> .....	- 58 -



## LIJST VAN TABELLEN

<i>Tabel 1: Maximum toegelaten afmetingen op het Albertkanaal (Bron: De Scheepvaart NV, z.d.)</i>	- 10 -
<i>Tabel 2: Vaartuigen die voorrang genieten op de waterwegen</i>	- 13 -
<i>Tabel 3: Factoren die de vraag en aanbod aan sluzen beïnvloeden</i>	- 16 -
<i>Tabel 4: Samenvatting aankomsttijden Ham stroomafwaarts (richting Wijnegem)</i>	- 32 -
<i>Tabel 5: Samenvatting aankomsttijden Wijnegem stroomopwaarts (richting Ham)</i>	- 33 -
<i>Tabel 6: Samenvatting tussenaankomsttijden Ham stroomafwaarts</i>	- 34 -
<i>Tabel 7: Samenvatting tussenaankomsttijden van groepen, Ham stroomafwaarts</i>	- 36 -
<i>Tabel 8: Samenvatting gegevens woensdag 6 maart 2013, Ham stroomafwaarts</i>	- 37 -
<i>Tabel 9: Samenvatting afmetingen schepen, Ham stroomafwaarts</i>	- 39 -
<i>Tabel 10: Tijden voor openen/sluiten van sluisdeuren en waterpeil te veranderen</i>	- 40 -
<i>Tabel 11: Samenvatting bedieningstijden Wijnegem stroomopwaarts</i>	- 40 -
<i>Tabel 12: Samenvatting t-test voor vaartijden</i>	- 41 -
<i>Tabel 13: Samenvatting vaartijden 1 maart t.e.m. 4 maart, Ham – Olen stroomafwaarts</i>	- 43 -
<i>Tabel 14: Overzicht van variabelen</i>	- 45 -
<i>Tabel 15: Overzicht assumpties simulatiemodel</i>	- 48 -
<i>Tabel 16: Vergelijking replicatielengte (tijden in uren)</i>	- 55 -
<i>Tabel 17: t-test Olen stroomopwaartse (observaties in uren)</i>	- 56 -
<i>Tabel 18: t-test Olen stroomafwaarts (observaties in uren)</i>	- 57 -
<i>Tabel 19: Samenvatting voor aankomsten aan de vier sluzen</i>	- 59 -
<i>Tabel 20: analyse afhankelijkheid op basis van gemiddelde wachttijden (in uren)</i>	- 59 -
<i>Tabel 21: Wachttijd (in uren)</i>	- 60 -
<i>Tabel 22: Aanbod (in uren)</i>	- 61 -
<i>Tabel 23: Samenvatting afhankelijkheidsanalyse bij onafhankelijke aankomsten</i>	- 62 -
<i>Tabel 24: Analyse aankomsten bij hogere sluis capaciteit</i>	- 64 -
<i>Tabel 25: Samenvatting afhankelijkheidsanalyse scenario A</i>	- 65 -
<i>Tabel 26: Samenvatting afhankelijkheidsanalyse scenario B</i>	- 66 -
<i>Tabel 27: Samenvatting afhankelijkheidsanalyse scenario C</i>	- 66 -
<i>Tabel 28: Gemiddelde en maximale wachttijden (in uur) per scenario</i>	- 67 -
<i>Tabel 29: BI gepaarde t-test van gemiddelde wachttijd basisscenario versus scenario A</i>	- 68 -
<i>Tabel 30: BI gepaarde t-test van gemiddelde wachttijd basisscenario versus scenario B</i>	- 69 -
<i>Tabel 31: BI gepaarde t-test van maximale wachttijd basisscenario versus scenario C</i>	- 69 -





# HOOFDSTUK 1: PROBLEEMSTELLING

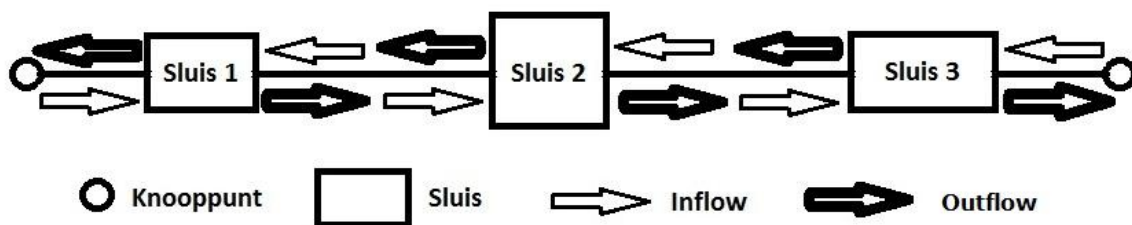
## 1.1 PRAKTIJKPROBLEEM

België wordt vaak gezien als hét logistieke hoofdkwartier van het Europese continent. Een belangrijke reden is de centrale ligging tussen de noordelijke Europese landen en de gebieden rond de Middellandse Zee. In een tijdspanne van slechts enkele uren kunnen afstanden naar belangrijke Europese hoofdsteden zoals Londen, Frankfurt en Parijs overbrugd worden. Een uitgebreid transportnet is dan ook uitgegroeid over land, water en lucht. Deze containertransport kent sinds 2005 een sterke bloei in België. Deze bloei zorgt voor een toename in de ontwikkeling van transportmodi (Business Belgium, 2010). Het gevolg van deze toename is dat het goederenverkeer voortdurend stijgt, resulterend in verkeerscongesties. Het Federaal Planbureau (2009) voorspelde in 2005 dat op 25 jaar tijd het totaal aantal tonnage vervoer via weg-, spoor- en binnenvaarttransport in België met 51% zal toenemen. Deze toename zal grotendeels worden opgevangen door het wegverkeer, resulterend in een stijging van congestieproblemen (Vandewalle, 2009). Martinelli et al. (1993) rapporteerden eveneens dat het verkeer aan vele sluzen consistent blijft stijgen. Hierdoor kan geconcludeerd worden dat de rol van alternatieve transportmodi belangrijk is in het behoud van een vlot goederenverkeer. In dit thesisonderwerp zal het watertransport via de binnenvaart als alternatieve transportmodus worden onderzocht.

Om het watertransport te stimuleren heeft de overheid verschillende financiële steunmaatregelen ingevoerd. Een voorbeeld is het Kaaimurenprogramma waarbij de infrastructuurkosten voor de aanleg van een nieuwe kaai voor 80% door de overheid worden gedragen. Dit betekent dat nog 20% overblijft als privé-investering. Naast het Kaaimurenprogramma bestaan ook subsidieregelingen voor onder andere de binnenvaartschepen en intermodaal transport. Door het intermodaal transport te subsidiëren, geeft de overheid steun aan het vrachtverkeer van containers over meerdere transportmodi, waaronder het watertransport (Binnenvaart, z.d.).

Dai en Schonfeld (1998) rapporteren dat het binnenvaarttransport in de Verenigde Staten vooral interessant is voor zware ladingen en bulktransport. Dit omwille van de verschillende voordelen inzake kosten, energieverbruik en veiligheid. Binnen het netwerk van waterwegen is echter meestal geen continue doorstroom. Sluizen die binnen het netwerk gelegen zijn hebben als functie de doorvaart van schepen mogelijk te maken. Sluizen zijn echter tegelijkertijd belemmerend voor de doorvaart. Ze zorgen dat schepen moeten wachten met als gevolg dat congestie ontstaat. Volgens Dai en Schonfeld (1998) vormt een sluis de grootste flessenhals die de continue doorvaart van schepen belemmert. Met andere woorden, door sluizen ontstaan wachttijden voor het watertransport. Daarom wordt aan de hand van wetenschappelijke literatuur nagegaan hoe deze wachttijden worden gemodelleerd en welke effecten bijdragen tot de duur van deze wachttijden.

De wachttijden aan opeenvolgende sluisen zijn complex. Ten eerste is in een wachtrij normaliter eenrichtingsverkeer. Het wegtransport bijvoorbeeld, is voorzien van rijstroken waarop in slechts één richting mag worden gereden. Dergelijke rij- of vaarstroken bestaan niet aan sluisen. Eenzelfde sluis versast de schepen die zowel stroomopwaarts als stroomafwaarts varen, weliswaar niet tegelijkertijd. De waterwegen zijn daarom, in tegenstelling tot het wegverkeer, tweerichtingsverkeer. Dit tweerichtingsverkeer wordt door de zwarte pijlen afgebeeld in figuur 1. Bovendien bestaat er afhankelijkheid tussen sluisen die serieel gelegen zijn. In een serieel systeem is de uitvoer van het ene proces de invoer van het volgende proces. Dit wil zeggen dat de aankomsten afhankelijk zijn van de vertrekken aan het voorgaande proces. Precies hetzelfde geldt voor seriële sluisen. De aankomsten aan een sluis zijn afhankelijk van de vertrekken aan de voorgaande sluis. Wanneer een vertraging zich voordoet aan een sluis, zal dit ook een vertraging opleveren aan de volgende sluis. Bijgevolg mogen wachttijden aan een serieel gelegen sluis niet onafhankelijk bekeken worden. (Dai & Schonfeld, 1998)



**Figuur 1: Serieel opeenvolgende sluisen (Bron: Dai & Schonfeld, 1998, eigen bewerking)**

Verder rapporteren Dai en Schonfeld (1998) dat omwille van de complexiteit van het sluisensysteem reeds vele verdelingen voor de aankomst- en bedieningstijden werden onderzocht. Echter is de conclusie dat geen consistent succes bestaat voor een specifieke verdeling. Het tweerichtingsverkeer compliceert de afhankelijkheid van sluisen zodanig dat reeds bepaalde modellen van wachtrijen niet bruikbaar zijn voor het analyseren van de wachttijden aan sluisen. Daarom is een empirische verdeling nodig om een simulatie te maken van sluisen die van elkaar afhankelijk zijn. Bovendien verschillen bedieningstijden per sluis, ze zijn dynamisch en afhankelijk van de toegewezen sluiskamer. Grootte en infrastructuur kunnen verschillen bij elke sluiskamer, zodat ze niet dezelfde grootte van schepen kunnen versassen. In figuur 1 is te zien dat het tweede sluisencomplex, aangeduid als 'Sluis 2', breder is dan het eerste sluisencomplex (Sluis 1). Het derde sluisencomplex (Sluis 3) is langer dan het eerste sluisencomplex. Binnen een sluisencomplex is meestal de hoofdsluis groter dan de parallel gelegen sluiskamers. Hierdoor kunnen grotere schepen enkel deze grotere sluiskamer binnenvaren terwijl kleinere schepen in beide sluisen passen. De wachttijd voor een kleiner schip zal dan mogelijk aanzienlijk afwijken van de wachttijd voor een groter schip. Het kan ook voorvallen dat grote schepen in stukken worden 'gesneden' om in de sluiskamer te passen. Hierdoor gaan de bedieningstijden drastisch omhoog (Smith et al., 2009). Het splitsen van schepen komt echter zeer weinig voor in Vlaanderen, dit gebeurt vooral in het Noordelijke gedeelte van Amerika, zoals op de Mississippi. In Vlaanderen komt dit fenomeen

enkel voor in de duwvaart. Namelijk voor een konvooi van een duwboot met tweemaal twee duwbakken. Hier worden de vier bakken dan per twee gesplitst. (De Scheepvaart NV, z.d.)

Het ritme van de aankomsttijden aan de ene sluis is afhankelijk van het ritme van de vertrektijden aan de twee aangelegen sluisen, namelijk de stroomopwaarts en de stroomafwaarts gelegen sluisystemen. In figuur 1 wil dit zeggen dat de aankomsten van de tweede sluis worden beïnvloed door de vertrekken (in de richting van de tweede sluis) van de eerste en derde sluis. Bovendien zijn de vertrekken aan de eerste en derde sluis gecorreleerd met de aankomsten vanuit de tweede sluis. Dit omdat deze aankomsten ervoor zorgen dat een versassing zal plaatsvinden. De tijdsduur van deze versassing beïnvloedt de tijd dat de schepen in de andere richting moeten wachten en hun vertrektijden. Het is duidelijk dat de aankomsten aan een sluis, zowel stroomopwaarts als stroomafwaarts, complex worden door het tweerichtingsverkeer. Bovendien zijn afstand en de gevaren snelheid tussen twee sluisen van invloed op de aankomsttijden zodat het moeilijk is om een voorspelling te maken van het moment van aankomst. (Dai en Schonfeld, 1998)

De sluis kamers in een sluisencomplex zijn parallel gelegen en kunnen onafhankelijk van elkaar bediend worden. Dit houdt in dat de werking van één sluis kamer geen enkele invloed heeft op de werking van de andere sluisen binnen hetzelfde complex. Elke sluis kamer is uniek en heeft naast infrastructurele verschillen (zoals de lengte en breedte), verschillen in onder andere personeel en werking (staat en type van sluisdeuren). (Smith et al., 2009). In Vlaanderen zijn alle sluisen van het Albertkanaal uitgerust met eenzelfde aantal en type sluis kamers: twee gewone sluisen en één duwvaartsluis. Omwille van de congestie, vooral aan de sluis van Wijnegem, is er nood aan het verhogen van de sluis capaciteit. Echter omdat deze sluisencomplexen volledig door woningen en industrie zijn omgeven, kan niet zomaar worden uitgebreid om een extra sluis kamer aan te leggen. Bijgevolg zijn alternatieven nodig voor het verhogen van de capaciteit. (NV De Scheepvaart, z.d.)

## 1.2 ONDERZOEKSVRAGEN

Uit het praktijkprobleem kan afgeleid worden dat nood is aan een reductie van congestieproblemen. Vooral aan sluisen die een belangrijke economische ligging hebben, vormt een vermindering in congestie een verbetering voor het waterwegtransport. Zo is het sluisencomplex in Wijnegem de enige doorgang tussen de Haven van Antwerpen en het Albertkanaal. Door hier wachttijden te reduceren ontstaat een vlottere doorstroom van schepen, met mogelijk een positieve impact op de economie. Aangezien de complexiteit bij het modelleren van de wachttijden ligt bij de afhankelijkheid die aanwezig is tussen serieel gelegen sluisen, vormt dit de focus van deze thesis. Vandaar dat de centrale onderzoeksvraag als volgt is geformuleerd:

**COV:** *"Hoe kunnen afhankelijkheid en wachttijden aan opeenvolgende sluisen gemodelleerd en gereduceerd worden?"*

Volgende deelvragen zijn opgesteld om hulp te bieden bij het beantwoorden van de centrale onderzoeksvraag:

- DV1:** *Welke factoren hebben een invloed op de wachttijden aan opeenvolgende sluizen?*
- DV2:** *Wat is de invloed van aanliggende sluizen op de wachttijden aan een sluis?*
- DV3:** *Hoe worden wachttijden aan opeenvolgende sluizen gereduceerd in de wetenschappelijke literatuur?*
- DV4:** *Hoe wordt afhankelijkheid gereduceerd in de wetenschappelijke literatuur?*
- DV5:** *Hoe worden wachttijden aan opeenvolgende sluizen gemodelleerd in de wetenschappelijke literatuur?*
- DV6:** *Volgen de aankomsten aan de sluizen van de binnenvaart een statistische verdeling?*
- DV7:** *Is het mogelijk om afhankelijkheid te identificeren door de sluizen van het Albertkanaal te modelleren?*
- DV8:** *Hoe kunnen wachttijden en afhankelijkheid aan de binnenvaart worden gereduceerd?*

### 1.3 METHODOLOGIE

In het tweede hoofdstuk van deze thesis zal een literatuurstudie uitgevoerd worden op basis van wetenschappelijke papers. Hiervoor zal gebruik gemaakt worden van de databanken beschikbaar via de bibliotheek van de Universiteit Hasselt. Het derde hoofdstuk van de thesis bestaat uit een praktijkstudie over de drie serieel gelegen sluizen van Wijnegem, Olen en Ham. De praktijkstudie bestaat uit een analyse van de data en het opstellen van een simulatiemodel. Hiervoor zal gebruik gemaakt worden van het computerprogramma Arena van Rockwell Software.

In de literatuurstudie wordt gezocht naar een antwoord op de eerste vijf deelvragen. Dit houdt in dat in de eerste plaats onderzoek wordt gevoerd naar factoren die een invloed hebben op het aankomst- en vertrekritme aan opeenvolgende sluizen. Ten tweede wordt onderzocht hoe de wachttijden aan een sluis worden beïnvloed door de omliggende sluizen. Dit wil zeggen dat het afhankelijkheidsaspect tussen serieel gelegen sluizen wordt onderzocht. Ten derde wordt om de doorvaart van schepen te kunnen verbeteren gezocht naar oplossingen die de wachttijden en de afhankelijkheid mogelijk reduceren. Deze oplossingen kunnen vervolgens onderzocht worden in de praktijkstudie. Ten slotte wordt in de wetenschappelijke literatuur gezocht naar verschillende bestaande methoden die de wachttijden van sluizen modelleren. De meest relevante methode zal worden toegepast op de praktijkstudie.

In de praktijkstudie zal eerst onderzocht worden of de aankomst- en tussenaankomsttijden een statistische kansverdeling volgen. Dit om de normaliter aanwezige afhankelijkheid te identificeren. Vervolgens wordt een simulatiemodel opgesteld van de drie sluizencomplexen met elk één sluiskamer. Hierbij worden de werkelijke aankomsttijden van maart 2013 gebruikt als invoer voor de twee buitenste sluizen, d.w.z. Wijnegem stroomopwaarts en Ham stroomafwaarts. Naast dit basismodel wordt een tweede model met onafhankelijke aankomsten gebouwd. Zo wordt nagegaan of de aankomsten aan de tweede en derde sluis nog steeds afhankelijk zijn wanneer de aankomsten aan de eerste sluis onafhankelijk zijn. Dit levert een bewijs dat de aankomsten afhankelijk zijn van de vertrekken aan de voorgaande sluis. Hierna wordt een sensitiviteitsanalyse uitgevoerd om zowel de afhankelijkheid als de wachttijden proberen te reduceren. De twee sensitiviteitsparameters komen voort uit de literatuurstudie. De eerste is een verandering in prioriteitsregels en de tweede een verandering in de tijd waarin gewacht wordt op een volgend schip vooraleer te starten met een versassing. De nodige data werd beschikbaar gesteld door NV De Scheepvaart.



## HOOFDSTUK 2: LITERAATUURSTUDIE

### 2.1 INLEIDING

Voorafgaande aan de literatuurstudie wordt een inleiding gegeven bestaande uit belangrijke begrippen over het operationele aspect van de sluisen op het Albertkanaal. Eerst wordt het principe van de sluiswerking besproken. Vervolgens wordt overgegaan op een algemene bespreking van het Albertkanaal en de karakteristieken van de sluisen die erop gelegen zijn. Dan worden de sluiscapaciteit, prioriteitsregels en de soorten versassing besproken. Na deze inleiding wordt een overzicht gegeven van de verschillende factoren die een invloed hebben op de wachttijden aan opeenvolgende sluisen. Hierna wordt dieper ingegaan op de afhankelijkheid tussen sluisen. Vervolgens wordt onderzocht welke methoden in de wetenschappelijke literatuur bestaan om wachttijden en afhankelijkheid te reduceren. De literatuurstudie wordt afgesloten met een onderzoek naar verschillende methoden om wachttijden aan sluisen te modelleren.

#### 2.1.1 HET PRINCIPE VAN EEN SLUIS

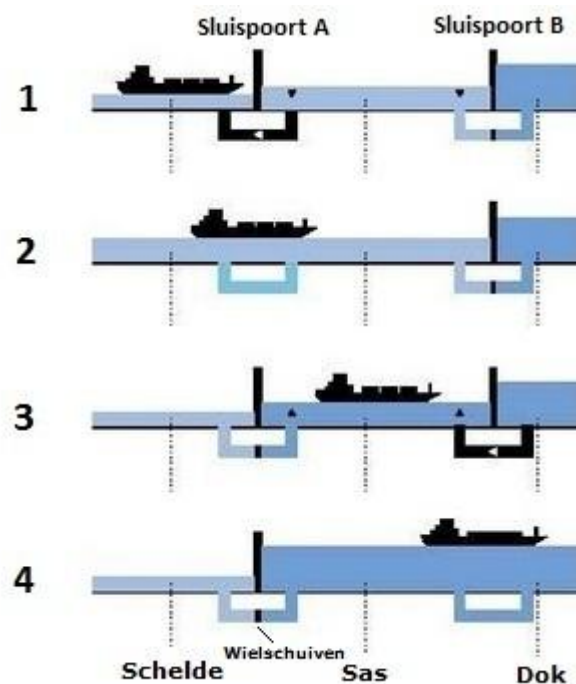
Allereerst bestaan voor het woord 'sluis' een aantal synoniemen, namelijk sas, vallaat, verlaat, sluiscolk en schut of schutsluis (Synoniemen.net, 2013). Van Dale (2013) definieert een sluis als 'een kunstmatige, beweegbare waterkering die de verbinding tussen twee wateren of tussen de delen van een water kan afsluiten of openstellen'. Encyclo (2013) definieert een sluis als 'een waterkering tussen twee wateren met verschillend waterstand'. Afgeleid van deze twee definities kan het vrijer worden gedefinieerd als 'een beweegbare waterkering tussen twee waterdelen met een verschillend waterpeil'. Intuïtief is het duidelijk dat sluisen bestaan om verschillen in het waterpeil te overbruggen.

Elke sluis heeft een aantal sluis kamers met een bepaalde infrastructuur. Soms is slechts één sluis kamer voorzien, maar meestal zijn er twee of drie parallel gelegen sluis kamers. In Amerika hebben deze sluis kamers meestal een grootte van 110ft x 1200ft of 110ft x 600ft (Dai & Schonfeld, 1997). Omgerekend in meter met 1ft = 0,3048m betekent dit dat de sluis kamers een grootte van 33,63m x 365,76m en 33,63m x 182,88m hebben. Dit is beduidend groter dan de typische grootte van de sluisen op het Albertkanaal. Hier wordt een onderscheid gemaakt tussen een duwvaartsluis en een gewoon sas. De duwvaartsluis is met een grootte van 24m x 200m de grote sluis kamer en een gewoon sas is de kleine sluis kamer met een grootte van 16m x 136m. (De Scheepvaart NV, z.d.)

De werking van een sluis kan aan de hand van figuur 2 worden uitgelegd. Hierbij gaat het om een schip dat het dok vanuit de Schelde wil binnenvaren. Omdat de Schelde een getijdenrivier is kan het waterpeil tot 5,70 meter lager liggen dan het waterpeil van de havendokken. Het waterpeil van de Schelde kent dus net zoals de zee een hoog- en laagtij. In de eerste stap van figuur 2 komt het schip aangevaren vanuit de Schelde. Het waterpeil in de sluis (sas) moet zodanig zakken dat het



gelijk staat met het waterpeil van de Schelde. Dit gebeurt door gigantische kleppen, gekend als wielschuiten die gelegen zijn in de omloopriolen, open te zetten zodat het water kan doorstromen. Wanneer hetzelfde waterpeil wordt bereikt aan wederzijden van sluispoort A kan deze worden geopend zodat het schip de sluiskamer kan binnenvaren. Dit is te zien in de tweede stap van figuur 2. Eens het schip in de sluiskamer zit wordt de sluispoort gesloten en kan het schip worden versast door het waterniveau gelijk te brengen met het waterpeil van de havendokken (derde stap van figuur 2). Wanneer het waterpeil tot boven is gestegen kan de schipper zich begeven naar de sluismeester(s) om de nodige documenten in orde te maken. Wanneer dit in orde is mag sluispoort B worden geopend en kan het schip de dokken binnenvaren, dit is stap 4 in figuur 2. (Deurganckdoksuis, 2009)



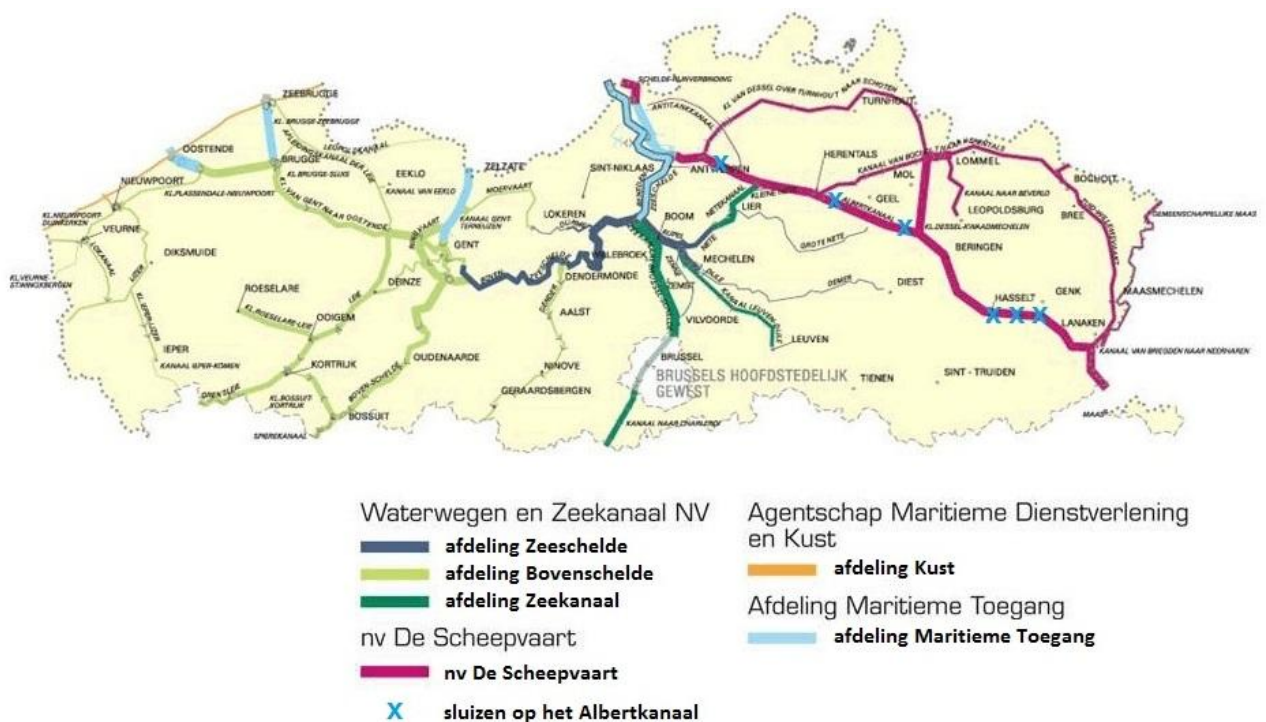
**Figuur 2: Versassen door een sluis (Bron: Deurganckdoksuis, 2009, eigen bewerking)**

Via de omloopriolen staat een sluis in verbinding met het wateroppervlak dat zich bevindt aan de andere kant van de sluispoort. De werking van een sluis steunt op de **wet van communicerende vaten**. Wanneer de wielschuiten de riolen open zetten kan water in (of uit) de sluis lopen. Het water stroomt tot wanneer het waterpeil gelijk is aan beide zijden van de sluisdeuren (Deurganckdocksuis, 2009). Dit komt overeen met de wet van Pascal waarvoor de definitie door Young & Freedman (2008) wordt gegeven als 'een druk uitgeoefend op een omsloten vloeistof wordt gelijk verdeeld over elke portie van de vloeistof en de zijkanten van het vloeistofbevattende vat'. Door de druk die gelijk verdeeld wordt over de hele vloeistof, ontstaat een vloeistofpeil dat overal gelijk is binnen het vat. (Young & Freedman, 2008). Een communicerend vat wordt gecreëerd doordat een sluiskamer in open verbinding staat met het aangrenzende wateroppervlak, in dit geval het water van de havendokken of van de Schelde. Binnen dit 'vat' verdeelt de druk zich gelijk over het hele wateroppervlak zodat die tot een gelijk niveau zal stromen. Als dan het

wateroppervlak hetzelfde niveau bereikt heeft aan beide zijden van de sluisdeuren, kunnen ze sluisdeuren geopend worden en kunnen schepen binnen- of buitenvaren.

### 2.1.2 HET ALBERTKANAAL

Het Albertkanaal vormt met een totale lengte van 129.577 kilometer de waterverbinding tussen de haven van Antwerpen en het industriële gebied van Luik (Promotie Binnenvaart Vlaanderen, 2008). Jaarlijks wordt meer dan veertig miljoen ton goederen vervoerd over het Albertkanaal. Hiermee is het één van de belangrijkste kanalen van België (De Scheepvaart NV, z.d.). Voor het gedeelte van Limburg en een klein stukje van Antwerpen, is De Scheepvaart bevoegd voor het beheer van het Albertkanaal (Vlaamse Overheid departement Mobiliteit en Openbare Werken, z.d.). De andere drie instanties zijn Waterwegen en Zeekanaal NV, Agentschap Maritieme Dienstverlening en Afdeling Maritieme Toegang. Waterwegen en Zeekanaal NV is bevoegd voor de Zeeschelde, de Bovenschelde en het Zeekanaal, en het Agentschap Maritieme Dienstverlening voor de kust. De Afdeling Maritieme Toegang heeft de verantwoordelijkheid voor de verschillende toegangswaterwegen tot de zee (Binnenvaart, 2008). Op de kaart in figuur 3 zijn de verschillende waterwegen van Vlaanderen aangeduid volgens de verschillende waterwegbeheerders. Het Albertkanaal is de dikke purperrode lijn die loopt vanuit Antwerpen.



**Figuur 3: De Vlaamse waterwegen onderverdeeld volgens waterwegbeheerder (Bron: Binnenvaart, 2008, eigen bewerking)**

Op het Albertkanaal zijn in Vlaanderen zes sluizen gelegen: Wijnegem, Olen, Ham (Kwaadmechelen), Hasselt, Diepenbeek en Genk. Ze zijn aangeduid met een blauw kruisje in figuur 3. Alle zes hebben zij eenzelfde infrastructuur: twee gewone sassen, het noordersas en het middensas, met een grootte van 136m x 16m en één duwvaartsluis met een grootte van 200m x 24m (De Scheepvaart NV, z.d.). Na de sluis in Genk is nog één sluiscomplex gelegen in Luik, maar dit behoort tot het Waalse Gewest. Dit sluiscomplex is gelegen in Klein Ternaaien en wordt ook wel 'de stop van Ternaaien' genoemd. Hier zijn de sluiskamers beduidend kleiner met twee sassen van 55m x 7,5m en één sas van 136m x 16m. Echter is door gebrek aan onderhoud nog enkel de grote sluiskamer van Ternaaien in gebruik. Om deze reden is gestart met de aanleg van een vierde sluiskamer. Deze heeft een geplande grootte van 200m x 25m, één meter breder dan de duwvaartsluizen van de zes sluizen op het Vlaamse gedeelte van het Albertkanaal (Kleinternaaien, 2013).

Het Albertkanaal legt door zijn diepte, breedte en infrastructuur restricties op. Hierbij wordt een onderscheid gemaakt tussen twee type vaartuigen: gewone vaartuigen en duwvaartvaartuigen. Deze laatste zijn schepen die zelf geen lading vervoeren maar als aandrijving dienen voor één of meer duwbakken. Gewone vaartuigen mogen om op het Albertkanaal te varen een maximaal laadgewicht van 2000 ton, een maximale lengte van 135 meter, een maximale breedte van 15 meter, een maximale diepgang van 3,40 meter en een maximale vrije hoogte van 6,70 meter hebben. De vrije hoogte kan op twee manieren worden gedefinieerd. In termen van het schip is de vrije hoogte de verticale afstand tussen het wateroppervlak en het hoogst gelegen punt van het schip. In termen van infrastructuur zoals bijvoorbeeld een brug, is dit de verticale afstand van het gemiddelde hoogwaterpeil tot het laagst gelegen punt van de brug. Voor de duwvaart geldt dezelfde maximale diepgang en vrije hoogte, maar de maximale lengte en maximale breedte is 197 meter en 23 meter respectievelijk. De beperkingen op de lengte en breedte zijn gerelateerd aan de afmetingen van de sluiskamers. De afmetingen van de gewone vaartuigen mogen de lengte en breedte van het gewone sas niet overschrijden en de afmetingen van de duwvaart niet die van de duwvaartsluis. In tabel 1 worden de maximale afmetingen samengevat per type vaartuig. De Scheepvaart NV (z.d.) heeft nagenoeg alle bruggen verhoogd tot de Europese norm van 9,10 meter. Hierdoor zal de maximale vrije hoogte stijgen met 3 meter. (De Scheepvaart NV, z.d.)

Vaartuigen		Duwvaartvaartuigen	
Laadgewicht	2.000 ton	Laadgewicht	10.000 ton
Lengte	134,00 meter	Lengte	196,00 meter
Breedte	12,50 meter	Breedte	23,00 meter
Diepgang	3,40 meter	Diepgang	3,40 meter
Vrije Hoogte	6,70 meter	Vrije Hoogte	6,70 meter

**Tabel 1: Maximum toegelaten afmetingen op het Albertkanaal (Bron: De Scheepvaart NV, z.d.)**

---

### 2.1.3 CAPACITEIT

Inzake capaciteit kan onderscheid gemaakt worden tussen de sluiscapaciteit en de capaciteit van de waterwegen. De sluiscapaciteit bepaalt hoeveel schepen kunnen versast worden in een specifieke sluis. Voor de duwvaartsluis is de sluiscapaciteit bijgevolg groter dan die van een gewoon sas. De capaciteit van de waterweg wordt bepaald door de sluis met de laagste sluiscapaciteit op een specifieke waterweg.

---

#### A. Sluiscapaciteit

Een goede definitie voor de schutcapaciteit of capaciteit van een sluis werd reeds in de jaren zeventig door Kooman en de Bruijn (1975) gegeven:

“De capaciteit van een schutsluis is de maximale hoeveelheid verkeer, uitgedrukt in een hoeveelheid schepen (aantal) of laadvermogen (tonnage), die onder de heersende omstandigheden per tijdseenheid kan worden geschut als het sluisbedrijf continu met volledig gevulde sluis kamers werkt.”

De definitie vermeldt dat de capaciteit een waarde is uit het berekende gemiddelde van een aantal versassingen in volledig gevulde sluis kamers. Dit betekent dat de capaciteit van een sluis bepaald wordt door het maximaal aantal schepen die per sluis kamer versast kan worden per tijdsduur. Vanzelfsprekend zijn enkele voorwaarden verbonden aan de geldigheid van een bepaalde capaciteit, namelijk de omstandigheden moeten exact hetzelfde zijn. Het type en de grootte van het schip, de tijdspanne, weersomstandigheden maar ook het sluispersoneel dat de sluis kamer bedient zijn parameters die de capaciteit kunnen beïnvloeden. (Kooman & de Bruijn, 1975)

Het gaat hier tevens om een maximale theoretische capaciteit die kan afwijken van de maximale praktische capaciteit. De praktische capaciteit kan worden gedefinieerd als “de hoeveelheid verkeer (in aantal schepen of laadvermogen in ton) waarbij er geen stijging in verkeer meer kan gebeuren omdat de kosten van wachttijden zodanig hoog worden dat alternatieve transportmodi aantrekkelijker worden.”. Omdat de effecten van wachtrijen veel belangrijker zijn, vooral in simulaties, is de praktische definitie met een oog voor wachttijden beter dan de theoretische definitie die het standpunt van maximale capaciteit aanneemt (Permanent International Association of Navigation Congresses, z.d.). Deze praktische definitie was ook een van de belangrijke onderwerpen voor Lave & DeSalvo (1968), die de capaciteit van de waterwegen onderzochten. Zij rapporteerden dat er een economische capaciteit voor sluisen bestaat. Het aantal schepen die bediend kunnen worden, vooraleer de bediening van een volgend schip, zal leiden tot wachttijden. Dit verwijst, net zoals de praktische definitie, naar een kost van wachttijden die een negatieve impact heeft op alle schepen, zodat er geen economische efficiëntie meer is (Lave & DeSalvo, 1968).

---

## B. Capaciteit van waterwegen

Zoals in de inleiding reeds vermeld zijn sluizen de flessenhalzen op de waterwegen. Goldratt (2004) meldt dat de flessenhals de capaciteit van het systeem bepaalt. Er kunnen verschillende flessenhalzen zijn, maar het is de bottleneck met de laagste capaciteit die de snelheid en dus de capaciteit van het systeem bepaalt (Goldratt, 2004). Lave & DeSalvo (1968) kwamen ook tot de conclusie dat de capaciteit van een waterweg wordt bepaald door de sluizen die dan als flessenhalzen fungeren, en dat tevens de sluisfaciliteit met de laagste bedieningstijd bepalend is voor de capaciteit van de waterweg (Lave & DeSalvo, 1968). Voor Vlaanderen betekent dit dat de capaciteit van het Albertkanaal wordt bepaald door de schutcapaciteit van de sluis die de laagste schutcapaciteit heeft. Aangezien de sluiskamers (zowel de gewone als de duwvaartsassen) van de zes sluizencomplexen een identieke infrastructuur hebben, is te verwachten dat zij eenzelfde schutcapaciteit hebben. Echter zal dit in de realiteit verschillen zodat niet duidelijk is welke sluis de laagste schutcapaciteit heeft.

---

### 2.1.4 PRIORITEITSREGELS

Een sluis is een wachtrijstelsel, waarbij prioriteitsregels kunnen worden toegepast op het versassen van schepen. Dit wil zeggen dat de volgorde waarin schepen de sluiskamer mogen binnenvaren beïnvloed kan worden door bepaalde schepen voorrang te verlenen. De meest gehanteerde prioriteitregel is de First In First Out, oftewel FIFO. Onder deze regel mag het schip dat als eerste de sluis benadert ook als eerste de sluiskamer binnenvaren, ongeacht het type of grootte. De focus van de prioriteitsregel ligt dus op de volgorde waarin schepen komen aanvaren. Een groot nadeel van dit systeem is dat de sluiskamer niet altijd op volledige capaciteit zal zijn. Wanneer het eerstvolgende schip dat de sluis nadert te groot is om nog in de sluiskamer te passen, zal de sluiskamer gesloten worden en begint het versassen. Dit wil uiteraard niet zeggen dat een kleiner schip dat net achter het grote schip vaart niet in de sluiskamer zou passen. Toch wordt deze volgens FIFO dan niet verscheept en moet het schip wachten. Dit maakt de wachtrij tevens onnodig langer.

Naast FIFO kan ook de prioriteitsregel Shortest Processing Time First, oftewel SPF, worden toegepast op de waterwegen. Hierbij zal voorrang worden gegeven aan schepen die de kortste sluisbedieningstijd hebben (Ting & Schonfeld, 2001). Het simulatiemodel van Smith et al. (2009) laat zien dat het geven van prioriteit aan de schepen die een kortere bedieningstijd vragen, verbeteringen met zich meebrengt. Het onderzoek van Ting & Schonfeld (2001) concludeert ook dat SPF grote verbeteringen met zich meebrengt ten opzichte van de FIFO prioriteit. SPF brengt echter het nadeel van oneerlijkheid met zich mee. Daarom is een "Fairer SPF of FSPF" een derde optie als prioriteitsregel. Deze FSPF methode maakt een trade-off tussen betere efficiëntie en eerlijkheid waarbij de positieve effecten van SPF te vinden zijn zonder dat dit al te veel ten koste gaat van de eerlijkheid. (Ting & Schonfeld, 2001). Theoretisch gezien is de laatste methode beter dan FIFO, maar dit wil uiteraard niet zeggen dat ze in de praktijk wordt toegepast. Verderop wordt

duidelijk dat De Scheepvaart NV de voorrangsregels van FIFO toepast. Ting & Schonfeld (2001) vermelden dat de efficiëntie bij SPF en FSPF nog slechts klein is wanneer schepen een vergelijkbare grootte hebben. Op het Albertkanaal in Vlaanderen zijn de schepen mogelijk meer vergelijkbaar in grootte dan in de Verenigde Staten, met als gevolg dat hun bedieningstijden meer overeenkomen en een SPF of FSPF mogelijk weinig voordeel oplevert.

In het Koninklijk Besluit van 15 oktober 1935 werd Het Algemene Reglement der Scheepvaartwegen van het Koninkrijk vastgelegd. Dit reglement wordt nog steeds vandaag de dag geïmplementeerd (Segers, 2013). In Artikel 28 van het reglement staan de regels met betrekking tot de doorvaartorde uitgeschreven. Algemeen geldt dat de volgorde van versassing gebeurt volgens de orde van aankomst, d.w.z. FIFO, met uitzondering van vaartuigen die recht op voorrang hebben. In tabel 2 wordt opgesomd welke vaartuigen voorrang bij doorvaart krijgen, dit in de gegeven volgorde. De regels één tot en met vijf geven de betreffende schepen absolute voorrang. Daarentegen geven regel zes en zeven vaartuigen slechts voorrang in afwisseling met reeds wachtende vaartuigen die volgens FIFO eerst waren. Bovendien kan de voorrang uit regel zes worden ontnomen door de scheepvaartinspecteur wanneer wordt vastgesteld dat de vereiste hoeveelheid slechts aan boord wordt gehouden om voorrang te kunnen genieten. (Koninklijk besluit, 15 oktober 1935)

Orde	Vorrangsregel
1	Vaartuigen die geladen zijn met buskruit, schietkatoen, knalstoffen of dynamiet.
2	(Militaire) vaartuigen die tot het leger toebehoren of vaartuigen die het leger helpen in vervoer en verrichtingen.
3	Vaartuigen van het bestuur van de waterwegen waarop de nationale vlag wordt gehesen.
4	Vaartuigen die gelaten zijn met bergingsmaterieel voor gezonken vaartuigen en een vaarbewijs hebben om zich ter plaatse van het ongeval te mogen begeven.
5	Vaartuigen die worden ingezet voor de geregelde vervoerdienst voor reizigers.
6	Vaartuigen die geladen zijn met andere vloeibare brandstoffen dan die van groep K3. De lading moet minstens 50 ton zijn, ofwel indien minder dan 100 ton moet de lading ten minste de helft van het laadvermogen zijn. (Brandstoffen worden onderverdeeld in drie gevarenklassen: K1 - o.a. benzine, K2 - o.a. petroleum en kerosine en K3 - o.a. gas- en dieselolie).
7	Vaartuigen die worden ingezet voor geregelde vervoerdienst van goederen.

**Tabel 2: Vaartuigen die voorrang genieten op de waterwegen**

Om de orde van aankomst op een objectieve manier te kunnen bepalen, gelden de stoppalen (palen langs de waterweg die schepen kunnen gebruiken om te stoppen) als grenslijn. Het schip dat als eerste de 500 meter stoppaal passeert wordt als eerste versast, met uitzondering op voorrang. Wederom heeft de Minister van Openbare Werken (of zijn gemachtigde) de machtiging om in dringende gevallen vaartuigen voorrang te verlenen. Dit is vooral bedoeld voor bevoorrading van het land of om ongevallen te voorkomen waarbij de scheepvaartwegen zijn betrokken. Tot slot schrijft de laatste paragraaf van Artikel 28 dat gewone vaartuigen voorrang hebben op vlottreinen en vloten, maar dezen mogen niet langer dan zes uur worden vertraagd. (Koninklijk besluit, 15 oktober 1935)

In de praktijk wordt niet één specifiek systeem gehanteerd. Eerst zullen schepen worden versast die een bepaalde voorrang genieten. Wanneer schepen geen recht op voorrang hebben wordt de orde van versassing bepaald door de FIFO regel. Echter wanneer het eerstvolgende schip geen passende afmeting heeft om nog in de sluiskamer te varen heeft de sluismeester twee opties. Ofwel sluit hij de sluisdeuren en begint het versassen, ofwel laat hij een ander schip binnenvaren dat wel een geschikte afmeting heeft. De sluismeester beslist naar eigen goeddunken welke optie het meest voordelig is met betrekking tot de wachtrij (Segers, 2013). Dit wil zeggen dat de sluismeesters het nadeel van FIFO wegwerken wanneer zij van mening zijn dat het een voordeel oplevert. Het is bijgevolg duidelijk dat in de praktijk de opgestelde regels worden gevolgd en indien het een voordeel oplevert voor de wachttijden, wordt afgeweken van FIFO zonder hierbij de regels te schenden.

---

#### 2.1.5 SOORTEN VERSASSING

In de literatuur maken Smith et al. (2009) onderscheid tussen drie soorten versassingen: een exchange, turnback of een fly lockage. Vertaald in het Nederlands is dit respectievelijk een uitwisselings-, een omdraai- en een vluchtversassing. Bij een uitwisselingsversassing vaart na het vertrek van een schip een volgende schip in tegengestelde richting de sluiskamer binnen. Hiervoor moet niets meer gebeuren in de sluiskamer aangezien reeds het waterniveau hetzelfde is en de sluisdeuren geopend zijn. Bij een omdraaiersassing vaart na vertrek van een schip het volgende schip de sluiskamer binnen in dezelfde richting. Dit wil zeggen dat de sluiskamer volledig moet worden omgedraaid: de sluisdeuren worden gesloten, het waterniveau moet op de juiste hoogte worden gebracht en de sluisdeuren aan de andere zijde moeten opnieuw worden geopend zodat het schip kan binnenvaren. Een vluchtversassing is een versassing waarbij de sluiskamer leeg is en het aankomende schip onmiddellijk kan binnenvaren (Smith et al., 2009). Een uitwisseling- en vluchtversassing verloopt normaliter sneller voor schepen aangezien zij onmiddellijk de sluiskamer kunnen binnenvaren.

## 2.2 FACTOREN DIE DE WACHTTIJDEN AAN OPEENVOLGENDE SLUIZEN BEÏNVLOEDEN

Vooraleer onderzocht kan worden welke factoren invloed hebben op de wachttijden aan opeenvolgende sluisen, is het nodig om te begrijpen hoe aan de sluisen wachttijden en wachtrijen ontstaan. Kelton et al. (2010) vermelden dat een wachtrij ontstaat wanneer een schip de sluiskamer wil binnenvaren op het moment dat de sluiskamer nog een ander schip aan het versassen is. Lave & DeSalvo (1968) rapporteerden reeds in de jaren zestig dat wachtrijen aan sluisen kunnen ontstaan door de stijging in het waterverkeer. Wanneer door economische groei meer en meer schepen zullen worden ingezet, zal op een bepaald ogenblik een groter aantal schepen tegelijkertijd versast willen worden. De wachttijden aan sluisen gaan bijgevolg stijgen. De oorzaak van de vertragingen aan een sluis is volgens de auteurs te wijten aan de willekeurige aankomsttijden van de schepen. Het is mogelijk dat op een bepaald tijdstip geen of weinig schepen zich aanbieden aan een sluis, en een ander moment veel schepen. Bij de laatste situatie is bijgevolg een hogere kans op vertragingen, d.w.z. congestie. (Lave & DeSalvo, 1968)

In vele onderzoeken werd reeds onderzocht welke factoren een invloed hebben op de wachttijden aan sluisen. De belangrijkste factoren zijn gegeven in tabel 3. De tabel werd opgesplitst in vraag en aanbod om de definitie van Fredj et al. (2001) te volgen. Deze definitie luidt: "Wachtrijen ontstaan wanneer gedurende een korte periode de vraag groter is dan het aanbod". Toegepast op sluisen betekent dit dat de vraag kan worden gezien als het aantal schepen dat een bepaalde sluis wil passeren op een bepaald moment in de tijd. Het aanbod kan op zijn beurt worden gezien als de hoeveelheid tijd die de sluis nodig heeft om het schip te versassen, ofwel de tijd die het schip nodig heeft om door de sluis te varen. Het aanbod wordt dan ook grotendeels bepaald door de sluisbedieningstijd (Kim en Schonfeld, 1995).



Factoren die de vraag beïnvloeden	Factoren die het aanbod beïnvloeden
Seizoensgebonden factoren	Omstandigheden waterweg
Economische groei	Weersomstandigheden
Reistijd	Maand / tijdstip
Congestie	Type versassing
Prijs	Vaarrichting
Alternatieve transportmodi	Sluisinfrastructuur
Omstandigheden waterweg	Prioriteitsregels
Weersomstandigheden	Bedrijfskarakteristieken
Onbekende risico's	Splitsen van schepen
Afhankelijkheid sluizen	Ratio schiplengte/sluiskamerlengte
	Ratio schipbreedte/sluiskamerbreedte
	Methode voor schepen in sluiskamer te plaatsen
	Variabiliteit van bedieningstijden

**Tabel 3: Factoren die de vraag en aanbod aan sluizen beïnvloeden**

Zoals in tabel 3 te zien is, vermelden Wang & Schonfeld (2007) dat variatie in de vraag aan een sluis veroorzaakt wordt door seizoensgebonden factoren, economische groei, de reistijd en de congestie-effecten op de reistijd, de prijs (d.w.z. transportkosten e.g. kosten van wegtransport, watertransport,...), alternatieve vervoersmodi, toestand van de rivier, onbekende risico's (d.w.z. onvoorziene situaties) en als laatste het afhankelijkheidsaspect van sluizen. Deze laatste factor is voor dit onderzoek belangrijk en wordt daarom apart besproken in het volgende deel.

Wang & Schonfeld (2007) rapporteren eveneens dat de bedieningstijd van een sluis het waterwegensysteem beïnvloedt en bijgevolg ook de vraag. Wanneer de bedieningstijden te hoog zijn zal de vraag aan een sluis lager zijn doordat alternatieve transportmodi lagere kosten met zich mee zullen brengen, ceteris paribus (Wang & Schonfeld, 2007). Dit is ook hetgeen Lave & DeSalvo (1968) reeds impliceerden met de economische capaciteit van een sluis. De bedieningstijd is hetgeen dat vooral bepalend is voor de aanbodzijde, dus er kan gezegd worden dat de vraag deels afhankelijk is van het aanbod aan een sluis.

De weeromstandigheden en eigenschappen van de rivier of kanaal (e.g. stroomomstandigheden, tij) beïnvloeden zowel de vraag als het aanbod aan een sluis. Dit is logisch omdat deze twee factoren het waterwegtransport in zijn geheel beïnvloeden. Bijvoorbeeld wanneer bij vriesweer het kanaal bevroren is, zullen schepen moeilijker kunnen doorvaren, maar tegelijkertijd zullen hoogstwaarschijnlijk de bedieningstijden van de sluizen wijzigen. Dit vult aan bij de factor 'maand'. Het is namelijk zo dat de tijd nodig om een schip te versassen verschillend is per maand door o.a. seizoensgebonden factoren. Zo blijkt uit de studie van Wilson (2006) dat in november en december

dit het langst duurt, en in januari het kortst. Naast de maand van het jaar is ook de dag en het moment van de dag van invloed op bedieningstijd. (Wilson, 2006)

Uit tabel 3 wordt duidelijk dat er meer factoren zijn die zorgen voor variatie aan de aanbodzijde dan aan de vraagzijde. Van het aanbod aan een sluis werd eerder gezegd dat dit voornamelijk wordt bepaald door de bedieningstijden. Dit werd gedefinieerd in de tweede paragraaf van deze sectie als "de tijd nodig om een schip in een sluis te versassen of de tijd die het schip nodig heeft om door de sluis te varen". Hoe sneller een schip door de sluis kan varen, hoe lager de bedieningstijd, wat uiteraard beter is. Dit doet ons terugdenken aan de types versassingen die in de inleiding werden besproken. Afhankelijk of het gaat om een vluchtversassing, uitwisselingsversassing of omdraaiersassing en in welke vaarrichting een schip komt aangevaren, kan het sneller versast worden (Smith et al., 2009). Naast de invloed van de relatie tussen het type versassing en de vaarrichting is het ook afhankelijk of er wordt gevaren in de richting van stroomafwaarts of stroomopwaarts. Het is namelijk zo dat een sluis ervoor zorgt dat het water van de sluis weg beweegt en dus in principe de schepen terug afstoot. Dit fenomeen is beter tegen te gaan wanneer een schip stroomopwaarts vaart. Bijgevolg zal stroomopwaarts een kortere bedieningstijd hebben (Wilson, 2006). Hiernaast beïnvloedt de infrastructuur, zoals het aantal en de grootte van de sluiskamers, ook de bedieningstijden. Tevens zijn de geldende prioriteitsregels belangrijk. Smith et al. (2009) toonden reeds aan dat wachttijden lager zijn wanneer er wordt gekozen voor een Shortest Processing Time First (SPF). (Smith et al., 2009)

Uit het resultaat van de studie van Wilson (2006) blijkt dat heterogeniteit heerst tussen schepen, bedrijven en sluisen. Deze heterogeniteit resulteert in significante verschillen in de performantie van sluisen. Wilson (2006) definieert sluisperformantie als 'het tijdig passeren van schepen door een sluis'. Dit wil zeggen dat bedrijfskarakteristieken het aanbod van een sluis beïnvloeden.

Verder zijn nog een aantal factoren van belang. Allereerste factor is het splitsen van schepen. In Vlaanderen moet enkel in de duwvaart een duwboot met tweemaal twee duwbakken gesplitst worden. De vier bakken worden dan per twee gesplitst (De Scheepvaart NV, z.d.). Ten opzichte van de Verenigde Staten is het aantal splitsingen dat gebeurt in Vlaanderen echter zeer klein. De resultaten uit wetenschappelijke literatuur die handelen over de invloed van het aantal splitsingen op de bedieningstijd kan bijgevolg niet zomaar worden geprojecteerd op het Albertkanaal. Uit de studie van Wilson (2006) blijkt dat het splitsen van schepen 71% van de variantie verklaart en daarmee de belangrijkste determinant uitmaakt van de bedieningstijd. Duidelijk is dat dit een belangrijke invloed heeft op de bedieningstijden, maar aangezien in Vlaanderen veel minder moet worden gesplitst, kan niet worden gezegd of dit ook een belangrijke determinant is voor de bedieningstijden van de sluisen op het Albertkanaal.

De tweede en derde factor gaan over de verhoudingen van de schipafmetingen t.o.v. de afmetingen van de sluiskamer. Deze handelen over de toegankelijkheid van de sluiskamer. Wanneer de afmeting van een schip kleiner is dan de sluiskamer, kan het schip versast worden

zonder te moeten splitsen. Echter wanneer een duwvaartschip met vier laadbakken zich wil laten versassen op het Albertkanaal zal deze, zoals eerder gezegd, moeten opgesplitst worden in twee keer twee laadbakken. Dit sluit tevens aan bij de factor 'vlootkarakteristieken' dat handelt over de afmetingen van een schip. Elk schip heeft zijn eigen mechanische karakteristieken (motor e.d.). Deze karakteristieken hebben invloed op de totale tijd dat een schip nodig heeft om versast te worden. Het gaat hier om karakteristieken zoals de configuratie van de schroef en het roer, de paardenkracht van de motor en de vorm van de romp. Hierbij moet ook rekening worden gehouden met het unieke aspect van de mens. De bemanning op elk schip bezit verschillende vaardigheden en gebruikt verschillend materiaal. Tevens is een schip vaak verbonden aan een specifiek bedrijf zodat bedrijfskarakteristieken kunnen gezien worden als een factor die de aanbodzijde aan een sluis kan beïnvloeden. (Wilson, 2006)

De laatste twee factoren zijn de methode voor het plaatsen van schepen in een sluis en de variabiliteit van de bedieningstijden. Dit laatste heeft een logische verklaring: wanneer de variabiliteit van de procestijd toeneemt, is het mogelijk dat een schip ook langer in de wachtrij moet aanschuiven (Kelton et al., 2010). Afhankelijk van de flexibiliteit van een schip krijgt het schip een bepaalde plaats in de sluiskamer toegewezen. De flexibiliteit van een schip hangt af van de grootte en de vorm. Een groter schip is minder flexibel dan een kleiner schip. Sommige schepen hebben een vorm die het uitvoeren van manoeuvres kan hinderen. Om de schepen te plaatsen volgens de flexibiliteit is uiteraard een systematische werking nodig, met name door middel van een heuristiek. Er kan bijvoorbeeld prioriteit gegeven worden aan de minst flexibele schepen (dit zijn meestal de grootste schepen), zodat deze ook de minst flexibele ruimte van een sluiskamer kan bezetten. De heuristiek berekent vervolgens een combinatie die optimaal is voor de flexibiliteit en tevens ook de hoogste bezetting van de sluiskamer geeft. (Theunissen & Janssens, 2005)

### 2.3 AFHANKELIJKHEID VAN SLUIZEN

De sluisen gelegen op het Albertkanaal vormen een serieel systeem. Dit betekent dat schepen die een sluis willen binnenvaren dezelfde schepen zijn als degene die de voorgaande sluis zijn uitgevaren (met uitzondering van schepen die het Albertkanaal tussen twee sluisen verlaten). De aankomsttijden aan een sluis zijn bijgevolg gerelateerd aan de vertrektijden aan de vorige sluis. Dai & Schonfeld (1998) vermelden dat een sluis afhankelijk is van een voorgaande sluis wanneer deze serieel op elkaar aansluiten. Hierbij komt het tweerichtingsverkeer, dat reeds werd geïllustreerd in figuur 1, zodat het gaat om een serieel systeem waarin de objecten zich in de twee richtingen kunnen verplaatsen. Ofwel varen de schepen stroomopwaarts, ofwel varen ze stroomafwaarts. Een sluis is dus afhankelijk van de twee aangrenzende sluisen en dit reflecteert zich in de aankomst- en wachttijden. Bovendien wordt in de paper van Dai & Schonfeld (1998) duidelijk dat de variatie van de tussenaankomsttijden aan een bepaalde sluis wordt beïnvloed door de variatie van de vertrektijden aan de eerste stroomopwaarts en stroomafwaarts gelegen sluis. De variatie in de vertrektijden aan deze twee sluisen wordt zelf beïnvloed door de variantie in de

vertrektijden aan de eerste sluis. De conclusie is dat de varianties van de tussenaankomsttijden aan aangrenzende sluisen ook afhankelijk zijn van elkaar. (Dai & Schonfeld, 1998)

Martinelli & Schonfeld (1995) hebben de afhankelijkheid van een sluis in numerieke waarden onderzocht. Wanneer sluisen niet afhankelijk zijn van elkaar, zullen ze geen invloed hebben op de aankomsten aan een volgende sluis. De totale vertraging van een systeem zal gelijk zijn aan de sommatie van de vertragingen aan elke geïsoleerde sluis. Met een geïsoleerde sluis wordt bedoeld dat de sluis als een onafhankelijk, gesloten systeem fungeert. Daarentegen wanneer afhankelijkheid geldt tussen twee of meer sluisen, zal de totale vertraging in het systeem niet gelijk zijn aan de som van de vertragingen aan elke geïsoleerde sluis. Met andere woorden, wanneer  $S$ , de totale vertraging, gelijk is aan  $I$ , de som van de geïsoleerde vertragingen, mogen de sluisen als onafhankelijk worden beschouwd. Dit kan ook in de verhouding  $S/I$ , de coëfficiënt voor de afhankelijkheid tussen sluisen, worden bekeken. Indien deze verhouding gelijk is aan één:  $S/I = 1$ , heerst onafhankelijkheid tussen de sluisen. Indien  $S/I < 1$  zijn de sluisen afhankelijk van elkaar. De verhouding  $S/I$  kan enkel kleiner zijn dan één aangezien in een afhankelijk systeem de som van de geïsoleerde vertragingen altijd groter is dan de totale vertraging. Met andere woorden, de totale vertraging in een afhankelijk systeem is kleiner dan de totale vertraging in een onafhankelijk systeem. In een afhankelijk systeem stellen de sluisen zich als het ware af op elkaar. De aankomsten gaan in groepen zijn, zodat de tijd tussen de eerste aankomst en de laatste aankomst kleiner gaat zijn. Op deze manier gaat een versassing dus sneller kunnen starten met als gevolg dat de wachttijden lager gaan liggen. Het is belangrijk op te merken dat de assumptie wordt gemaakt dat twee aanliggende sluisen vergelijkbare bedieningstijden hebben en de vaartuigen niet laden of lossen tussen de sluisen in. (Martinelli & Schonfeld, 1995)

Martinelli & Schonfeld (1995) hebben een minimale waarde voor de verhouding berekend. In een systeem met  $n$  sluisen is de minimale waarde van  $S/I = 1/n$ . Wanneer we de zes sluisen op het Albertkanaal als één geïsoleerd systeem zien, wil dit zeggen dat de minimale waarde van  $S/I = 1/6$ . Naast deze numerieke methode om te onderzoeken of sluisen afhankelijk zijn van elkaar is het ook mogelijk naar de aankomsttijden te kijken. Immers indien in een systeem, bestaande uit serieel gelegen sluisen, de aankomsttijden een Poisson verdeling hebben, zijn de effecten van de voorgaande sluis geneutraliseerd. Een Poisson verdeling is een discrete (de mogelijke waarden zijn beperkt in aantal) kansverdeling die gebruikt wordt om het aantal gebeurtenissen in een tijdsperiode te modelleren (Kelton et al., 2010). De invloed van een sluis kan verdwijnen wanneer schepen de kans krijgen om zich tussen twee sluisen in op een willekeurige manier te ordenen. Dit wordt mogelijk gemaakt door de afstand tussen twee sluisen, de gevaren snelheid en de toestand van de vaardoorgangen. Wanneer de effecten van de voorgaande sluis verdwenen zijn kan er ook niet gezegd worden dat de twee sluisen van elkaar afhankelijk zijn. De Poisson verdeling is namelijk enkel geldig wanneer de objecten in het systeem onafhankelijk zijn. Om te concluderen: sluisen zijn onafhankelijk van elkaar wanneer aankomsttijden een Poisson verdeling volgen. (Martinelli & Schonfeld, 1995)

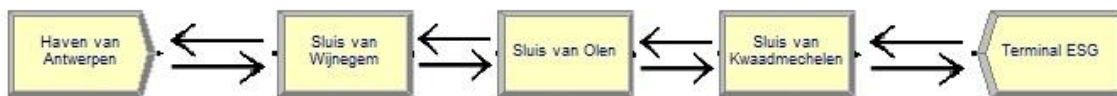
Uit het rapport van Martinelli & Schonfeld (1995) komen enkele relevante factoren naar voor die invloed hebben op de mogelijkheid tot willekeurige ordening van de vaartuigen. De belangrijkste factor is de *afstand tussen twee sluizen*. Hoe groter de afstand die vaartuigen moeten afleggen, hoe groter de opportuniteit om zich willekeurig te rangschikken. Bij langere afstanden is het dan ook waarschijnlijk dat vaartuigen meer willekeurig aankomen aan de volgende sluis. Bijgevolg is te verwachten dat de graad van afhankelijkheid lager is bij langere afstanden. Met andere woorden de afhankelijkheid tussen twee sluizen is negatief gecorreleerd met de afstand en bijgevolg met de mogelijkheid van vaartuigen om zich (willekeurig) te verspreiden. Andere factoren die invloed uitoefenen op de mogelijkheid van vaartuigen om zich willekeurig te verspreiden zijn de *snelheid* en *volume* van vaartuigen, de *infrastructuur* (die al dan niet de mogelijkheid biedt om een schip voorbij te varen) en uiteraard de *gehanteerde prioriteitsregels*. Daarnaast zijn nog twee factoren van invloed op de afhankelijkheid. De eerste is de *kritieke benutting*. Dit is de verhouding van het maximale volume dat een sluis passeert tot de sluiscapaciteit. Het is met andere woorden de maximale benutting van de sluiscapaciteit. Een hogere benutting (de verhouding is groter dan één) wil zeggen dat meer vaartuigen de sluis zullen passeren terwijl de sluiscapaciteit gelijk blijft. De sluis met de hoogste benutting is bijgevolg de zwakste schakel van het hele systeem. Goldratt (2004) beschrijft de zwakste schakel als de flessenhals van het systeem, waardoor deze ook 'kritieke sluis' wordt genoemd. Martinelli & Schonfeld (1995) voegen toe dat des te groter de kritieke benutting, des te groter de afhankelijkheid tussen de sluizen van het systeem. De tweede factor is de *relatieve benutting*. Dit is de verhouding van de benutting van een bepaalde sluis ten opzichte van de kritieke sluis. Deze factor laat de mate zien waarin de vertragingen aan een sluis worden gedomineerd door de vertragingen aan een kritieke sluis. Immers wanneer de sluiscapaciteit ongeveer gelijk is, betekent een lage relatieve benutting dat de sluis een klein volume heeft t.o.v. de kritieke sluis. Dit kleine volume wordt bepaald door de wachtrij die ontstaat door het grote volume aan de kritieke sluis. (Martinelli & Schonfeld, 1995)

Toegepast op het Albertkanaal is aan de hand van figuur 4 duidelijk dat de drie sluizen in Hasselt, Diepenbeek en Genk kort op elkaar gelegen zijn. De afstand tussen de sluizen van Hasselt, Diepenbeek en Genk bedragen respectievelijk slechts 4,5 km en 4,2 km. Over deze korte afstanden hebben de vaartuigen weinig opportuniteit om zich willekeurig te rangschikken. Hoogstwaarschijnlijk heerst hier dan ook een grotere afhankelijkheid. De sluizen van Wijnegem, Olen, Ham (Kwaadmechelen) en Hasselt liggen beduidend verder van elkaar: respectievelijk 23,9 km, 18,7 km en 27km. Over deze afstanden hebben de vaartuigen een betere kans zich willekeurig te verspreiden. (Promotie Binnenvaart Vlaanderen, 2008)



**Figuur 4: Albertkanaal in detail (Bron: Promotie Binnenvaart Vlaanderen, 2008)**

Aan de hand van figuur 5 wordt de afhankelijkheid tussen de sluizen geïllustreerd. Stel dat schepen die vanop zee de Haven van Antwerpen binnenvaren willen lossen in de Terminal van Euro Shoe Group (ESG), gelegen achter de sluis van Ham (Kwaadmechelen). Veronderstel tevens dat de afstanden tussen de drie sluizen klein genoeg zijn zodat afhankelijkheid geldt, de bedieningstijden van de drie sluizen vergelijkbaar zijn en de schepen enkel zullen lossen en laden in Terminal ESG. Wanneer nu het waterverkeer vanuit de Haven groter is dan de capaciteit van de sluis van Wijnegem, ontstaan lange wachtrijen in Wijnegem. Daarentegen zullen de sluizen van Olen en Kwaadmechelen kortere of geen wachtrijen hebben, daar de schepen aan deze sluizen komen aangevaren in een ritme dat ongeveer gelijk is aan het vertrekritme van de voorgaande sluis. Merk op dat de sluizen het verkeer vanuit twee richtingen moeten verwerken. Bijgevolg is de kans dat een vaartuig moet wachten, aan bijvoorbeeld de sluis van Olen wanneer het vanuit Wijnegem komt aangevaren, reëel.



**Figuur 5: Tweerichtingsverkeer sluizen**

## 2.4 OPLOSSINGEN OM WACHTTIJDEN EN AFHANKELIJKHEID TE REDUCEREN

Wachttijden aan sluizen zorgen ervoor dat schepen stilstaan in een wachtrij. Hierdoor verliezen de bedrijven geld omdat hun kostbare ladingen langer vervoerd worden dan ze willen. Het is dan ook van belang dat wachttijden kunnen verminderd worden. In de literatuur zijn een aantal oplossingen terug te vinden die kunnen leiden tot een reductie in wachttijden.

Omwille van de complexiteit die afhankelijkheid veroorzaakt, is het interessant om te onderzoeken welke mogelijkheden bestaan om afhankelijkheid te reduceren. Verschillende onderzoeken zijn reeds uitgevoerd naar het modelleren van de wachttijden aan sluizen. Hierbij wordt echter vaak de assumptie gemaakt dat het om een geïsoleerde sluis gaat. Hierdoor wordt geen rekening gehouden met het tweerichtingsverkeer en het afhankelijkheidsperspectief. De reden is dat afhankelijkheid aan sluizen onderzoek naar de werking en verbeteringen van sluizen complex maakt. (Smith et al., 2009).

---

#### 2.4.1 WACHTTIJDEN

Allereerst stellen Smith et al. (2009) voor om hulpbootjes te introduceren. Dit zijn bootjes die gaan helpen met het navigeren van de schepen zodat dezen sneller de sluis kunnen passeren op een veilige manier. Ze worden vooral ingezet bij drukkere sluizen of havencomplexen. Hun onderzoek wijst uit dat deze hulpbootjes een verbetering betekende voor de wachttijden aan de sluizen op de Upper Mississippi River.

Een tweede oplossing om wachttijden te reduceren is het implementeren van de juiste prioriteitsregels. In sectie 2.1.4 werd reeds aangehaald dat wachttijden kunnen worden verbeterd wanneer de prioriteitsregel van Shortest Processing First wordt toegepast in de plaats van de First In First Out regel. Zowel Ting & Schonfeld (2001) als Smith et al. (2009) toonden aan dat SPF als prioriteitsregels verbetering met zich meebrengt in de wachttijden.

---

#### 2.4.2 AFHANKELIJKHEID

In sectie 2.3 kwamen verschillende factoren aan bod die een invloed uitoefenen op de afhankelijkheid aan sluizen. De factoren die naar voren kwamen zijn de afstand tussen twee sluizen, de gevaren snelheid, de hoeveelheid verkeer (volume), infrastructuur, gehanteerde prioriteitsregels en de sluisbenutting. De afstand, de hoeveelheid verkeer en de infrastructuur kunnen niet zonder grote grepen aangepast worden. De snelheid van schepen kan niet naar keuze verhoogd of verlaagd worden. Zo blijven enkel de laatste twee factoren over. De prioriteitsregels en de benutting van een sluis kunnen aangepast worden. Prioriteitsregels beïnvloeden de afhankelijkheid omdat zij de orde van versassing bepalen. Bij het FIFO principe zal de volgorde van aankomsten gelijkaardig zijn aan de aankomsten van de voorgaande sluis wanneer schepen aan een gelijkaardige snelheid varen. Bij de SPF regel daarentegen zal voorrang worden gegeven aan schepen die sneller worden versast. Zo gaan deze schepen "voorkruipen" in de wachtrij (Martinelli & Schonfeld, 1995).

De benutting van een sluis heeft invloed op de afhankelijkheid omdat de sluis met de hoogste kritieke benutting (de maximale hoeveelheid trafiek die aan een sluis passeert ten opzichte van de sluiscapaciteit) bepaalt hoeveel schepen doorheen het systeem kunnen varen. Martinelli & Schonfeld (1995) rapporteren dat de afhankelijkheid tussen sluizen toeneemt naarmate de kritieke

benutting groter is. Bijgevolg zou de afhankelijkheid moeten dalen wanneer de kritieke benutting daalt. Dit kan gerealiseerd worden door de sluiscapaciteit te verhogen. Het is daarom mogelijk dat het verhogen van de sluiscapaciteit de afhankelijkheid tussen sluisen verlaagt.

Een derde mogelijkheid om afhankelijkheid te reduceren ligt in het feit dat schepen worden gegroepeerd. Uit de paper van Dai & Schonfeld (1998) wordt duidelijk dat het versassen in groep één van de voornaamste redenen is voor de afhankelijkheid tussen serieel gelezen sluisen. Wanneer schepen aan een gelijkaardige snelheid varen zullen zij aan een sluis aankomen in eenzelfde ritme als waaraan ze aan de vorige sluis zijn vertrokken. Aangezien schepen worden gegroepeerd, is het vertrekritme gerelateerd aan hoe de groepen worden samengesteld. Dit betekent enerzijds welk schip eerst mag versast worden en anderzijds de tijd waarop wordt gewacht om schepen te groeperen. Het eerste wordt bepaald door de prioriteitsregels wat reeds werd besproken. Met het tweede wordt bedoeld hoe lang maximaal wordt gewacht op een volgend schip (dat nog in de sluiskamer past), vooraleer te starten met de versassing. Wanneer langer wordt gewacht zal de groep van versaste schepen groter worden. De spreiding tussen de schepen verdwijnt nagenoeg wanneer ze tot een groep worden gevormd. De schepen kwamen immers op een verschillend moment aan maar vertrekken zo goed als op hetzelfde moment. Daarom is te verwachten dat hoe groter de groep, hoe kleiner de gemiddelde spreiding tussen de schepen en dus aankomsten. Spreiding tussen schepen is een vorm van willekeurigheid en dus onafhankelijkheid. Zo kan geconcludeerd worden dat het mogelijk is dat hoe langer gewacht wordt op een volgend schip, hoe lager de afhankelijkheid.

## 2.5 MODELLERING VAN WACHTTIJDEN AAN AFHANKELIJKE SLUIZEN

Sinds het einde van de jaren 60 werd meer en meer onderzoek uitgevoerd naar het schatten en modelleren van wachttijden aan sluisen. Het analyseren van de wachttijden is echter door het tweerichtingsverkeer en de afhankelijkheid tussen aanliggende sluisen zo complex dat de eerste modellen beperkingen moesten opleggen om tot een resultaat te komen. Het gevolg is dat wachttijden worden geschat door modellen die enkel geldig zijn voor bijvoorbeeld één sluiskamer of eenrichtingsverkeer, wat de toepasbaarheid zeer beperkt. De literatuur maakt een onderscheid tussen wachtrijmodellen, simulatiemodellen, metamodellen en artificiële neurale netwerken (Martinelli et al., 1993), (Martinelli & Schonfeld, 1995) en (Dai & Schonfeld, 1998).

### 2.5.1 WACHTRIJMODELLEN

Modellen uit de wachtrijtheorie zijn logische, mathematische modellen die in principe verzamelingen zijn van assumpties en benaderingen over hoe een systeem werkt of zou kunnen werken (Kelton et al., 2010). Veel wachtrijmodellen leggen assumpties op die meestal niet realistisch zijn. Zo zijn de modellen vaak geldig voor slechts één sluiskamer en wordt verondersteld dat de aankomsttijden een Poisson verdeling volgen en de bedieningstijden exponentieel zijn (M/M/1 model). De M staat voor Markovian, wat betekent dat de tijden (hier zowel aankomsttijden



(eerste M) als bedieningstijden (tweede M)) onafhankelijke en identiek verdeelde steekproeven zijn uit een exponentiële kansverdeling. Het cijfer één duidt erop dat het om één server (sluiskamer) gaat (Kelton et al., 2010). In werkelijkheid is een systeem redelijk complex en bestaat een sluizencomplex uit meer dan één sluiskamer (Dai & Schonfeld, 1998). Carroll & Bronzini (1973, in Dai & Schonfeld, 1998) concludeerden reeds dat sluisbedieningstijden geen exponentiële verdeling volgen en de aankomsttijden niet Poisson verdeeld zijn. Bertsimas (1988, in Dai & Schonfeld, 1998) verkreeg de exacte wachttijden bij een gemengde veralgemeende Erlang verdeling voor de aankomst- en bedieningstijden. Echter door het ontbreken van een gepaste functie voor de vertrektijden kan het model niet worden veralgemeend naar serieel gelegen sluizen. Verder vonden Dai & Schonfeld (1998) geen consistente overeenkomst voor andere statistische verdelingen. Tevens is voor dit onderzoek de afhankelijkheid tussen sluizen belangrijk. Wachtrijmodellen zoals die van DeSalvo (1968) (en verdere modellen gebaseerd hierop) en Bertsimas (1988, in Dai & Schonfeld) houden geen rekening met de afhankelijkheid omdat ze willekeurige aankomsttijden veronderstellen. Hierdoor zijn de resultaten van dergelijke modellen nog weinig betrouwbaar.

Martinelli & Schonfeld (1993) rapporteren dat de wachtrijtheorie goede oplossingen biedt voor de algemenere systemen zoals M/G/1 of G/M/1. De G staat voor "General" of algemene verdeling wat betekent dat het een willekeurige statistische kansverdeling betreft. Wanneer wordt uitgebreid naar G/G/1, wordt het systeem op een meer realistische manier bekeken, maar wachtrijtheorie kan hiervoor geen oplossingen bieden. Om de afhankelijkheid goed in kaart te brengen moet meer als één server worden geanalyseerd, dit betekent een model zoals G/G/M. Hiervoor zijn de methoden uit de wachtrijtheorie moeilijk uit te breiden naar een serieel netwerk van waterwegen. Er kan geconcludeerd worden dat wachtrijmodellen geen uitkomsten biedt voor de serieel gelegen sluizen waarbij afhankelijkheid een belangrijk aspect is. (Martinelli et al., 1993)

---

## 2.5.2 SIMULATIEMODELLEN

Een simulatiemodel wordt gebouwd om het gedrag van een bestaand sluisensysteem na te bootsen (Kelton et al., 2010). Simulatiemodellen gaan meer rekening houden met omstandigheden die in de realiteit een invloed uitoefenen op de wachttijden. Zo houden ze meer rekening met het tweerichtingsverkeer en de afhankelijkheid tussen de aanliggende sluizen. Bovendien wordt vaak meer dan één sluiskamer in het model verwerkt. (Martinelli & Schonfeld, 1993). Op deze manier zijn veel minder onrealistische beperkingen terug te vinden in de modellen. De simulatiemodellen gaan redelijk in detail zodat ze betrouwbaarder zijn, maar tegelijk heeft dit als nadeel dat ze meer inputgegevens vergen en vaak veel tijd op een computer nodig hebben (Dai & Schonfeld, 1998). Simulatiemodellen zijn geschikt voor het analyseren van systemen waarin onrealistische veronderstellingen worden gemaakt of waarvoor geen mathematische formules kunnen gebruikt worden. Het nadeel is echter dat ze tijdsintensief zijn zodat hun toepasbaarheid wordt beperkt tot problemen voor kleinere netwerken. (Martinelli et al., 1993).

De simulatiemodellen van Howe et al. (1968, in Dai & Schonfeld, 1998) en Carroll en Bronzini (1973, in Dai & Schonfeld, 1998) waren één van de eerste simulatiemodellen waarmee de wachttijden aan sluizen werden geanalyseerd. Deze discrete event simulatie (gebeurtenissen gebeuren op een specifiek ogenblik) van Carroll en Bronzini analyseert het lokale gedrag van de componenten van een systeem waarbij rekening wordt gehouden met de afhankelijkheid en de complexiteit (tweerichtingsverkeer) van het systeem (Smith et al., 2009). Ze gingen echter uit van Poisson verdeelde aankomsten en hielden geen rekening met sluisonderbrekingen (Dai & Schonfeld, 1998). Martinelli et al. (1993) rapporteren dat sluisonderbrekingen niet zomaar mogen genegeerd worden omdat dit de sluiscapaciteit verlaagt, of de wachttijden en vertragingen verhoogt. Tevens analyseren verschillende modellen de wachttijden op basis van één geïsoleerde sluis. Aangezien de wachttijden afhankelijk van elkaar kunnen zijn moet deze afhankelijkheid worden meegerekend, dit door het hele systeem in kaart te brengen. Daarom dat zij een model hebben ontwikkeld dat rekening houdt met zowel de sluisonderbrekingen als de afhankelijkheid, het tweerichtingsverkeer en het aantal sluis kamers. Dit model handelt ook over een breder systeem dan het voorgaande model van Carroll en Bronzini (Martinelli et al., 1993). Echter is dit model samen met het metamodel (zie sectie 2.4.3) van Dai & Schonfeld (1998) en vele andere modellen beperkt in gebruik omwille van twee simplificaties. Ten eerste gaat het meestal om een steady-state methode (de simulatie loopt over een oneindig lange tijdsframe (Kelton et al., 2010)) die de verandering in dynamische prestaties niet weergeeft. Ten tweede houden ze wel rekening met afhankelijkheid, maar hebben ze de vraag aan elke sluis als onafhankelijk van elkaar behandeld (Smith et al., 2009). Een model dat deze twee problemen wegwerkt is het model van Sweeney (2004, in Smith et al., 2009). Hierbij komen vaartuigen in het systeem via de noordelijke rivier. Vervolgens passeren ze alle sluizen in zuidelijke richting waarna ze via dezelfde sluizen noordwaarts terugkeren en zo telkens op en af. Deze continue circulatie houdt rekening met de seizoenen waarin verscheppingen plaatsvinden zodat op het einde een schip een laatste vaart noordwaarts doet. Zijn replicerende benadering is een eindigende (in plaats van continue) simulatie en creëerde sluisactiviteiten die afhankelijk zijn van elkaar. (Sweeney, 2004, in Smith et al., 2009). Hierbij werd echter een nieuw nadeel geïntroduceerd: in realiteit stoppen vaartuigen tussen de sluizen om te laden of te lossen waarna ze ofwel verder in dezelfde richting varen ofwel terug in de richting van waar ze komen. Omwille van deze reden heeft Smith et al. (2009) een verbeterd model opgesteld dat hier rekening mee houdt door o.a. het soort versassing en het tijdstip waarop dit gebeurt mee te analyseren. (Smith et al., 2009).

Een laatste interessant simulatiemodel is het veralgemeende simulatiemodel voor waterwegverkeer van Wang & Schonfeld (2002). Dit model baseert zich op de meetkundige aspecten van een waterweg netwerk, zodat het in principe toepasbaar is op elk systeem bestaande uit waterwegen en sluizen. Het unieke aan dit model is dat de geometrie kan worden aangepast door het invoeren van dummy variabelen, namelijk dummy havens, sluizen en rivieren. Dit zijn variabelen die enkel de waarde één of nul aannemen. De variabele neemt de waarde één aan wanneer een bepaalde infrastructuur (haven, sluis of rivier) aanwezig is op een bepaalde locatie in het netwerk. In het andere geval neemt de dummy de waarde nul aan. De resultaten van het model werden

vergeleken met wachtrijmodellen zoals M/M/1, M/M/2 en M/D/1 en vervolgens met observaties van een segment van de Mississippi en de Illinois rivier. De vergelijking met de wachtrijmodellen laat zien dat het veralgemeende model een goede schatting geeft voor de wachttijden. Uit de vergelijking met de observatie leiden de auteurs af dat de meeste karakteristieken van de sluizen op een correcte manier worden beschreven door hun model. Ze concluderen dat voor complexe systemen hun simulatiemodel mogelijk slechts een benadering zal zijn. (Wang & Schonfeld, 2002)

---

### 2.5.3 METAMODELLEN

Een andere model, dat minder tijd in beslag neemt dan een simulatiemodel, is een metamodel. Dit zijn modellen die onbekende parameters van vergelijkingen (functies) statistisch schatten uit simulatiedata, om zo de resultaten van een simulatiemodel te benaderen. De moeilijkheid van de metamodellen is het vinden van structurele vormen voor de benaderende functies die de simulatieresultaten zo goed mogelijk beschrijven. (Martinelli et al., 1993).

In de wetenschappelijke literatuur worden twee metamodellen teruggevonden die rekening houden met de mogelijke afhankelijkheid tussen aanliggende sluizen. Het eerste model is een numerieke methode ontwikkeld door Dai & Schonfeld (1998) die een snelle en goedkope schatting geeft voor de wachttijden aan een sluis. Hun model houdt rekening met afhankelijkheid, tweerichtingsverkeer en dienstonderbrekingen. Het gaat in feite om een decompositiemodel dat de verschillende wachtrijen onderverdeelt in aparte 'stations' van wachtrijen. Verder is elk station opnieuw onderverdeeld in drie fasen: aankomsten, vertrekken en vertragingen. Het is in deze eerste twee fasen dat rekening wordt gehouden met de afhankelijkheid. Voor de aankomstprocessen worden namelijk de verdelingen van de tussenaankomsttijden aan de twee aanliggende sluizen in acht genomen. De vertrekprocessen zijn afhankelijk van de interactie die bestaat tussen de verdelingen van de bedieningstijd en de verdelingen van de aankomsten aan eenzelfde sluis. Dit wil zeggen dat de vaartuigen aan een sluis aankomen met een vergelijkbaar ritme waarmee ze aan de vorige sluis aankomen en vertrekken. Verder wordt de relevantie van het model niet beperkt door de assumpties, al zijn bepaalde veronderstellingen niet realistisch (zoals bijvoorbeeld slechts één sluiskamer en identieke schepen). De validatie gebeurde door het model te testen op een sluizencomplex van drie sluizen. De geschatte wachttijden van het metamodel werden vervolgens vergeleken met die uit het simulatiemodel. Hieruit bleek dat het metamodel de wachttijden goed schat. Wanneer de wachttijden zeer klein zijn en de sluizen veel overcapaciteit hebben, blijkt het model maar een slechte schatting te geven. Het model is dus in principe nuttig, aangezien onderzoek ook vooral interessant is aan de sluizen waar wel veel congestie is. (Dai & Schonfeld, 1998)

Het tweede model werd opgesteld door Martinelli & Schonfeld (1995). Zij onderzoeken de afhankelijkheid tussen de sluis en de twee aanliggende sluizen door middel van een sensitiviteitsanalyse. Ze nemen een bestaand simulatiemodel en analyseren de impact op de wachttijden aan een bepaalde sluis door veranderingen van de karakteristieken van de

aanliggende sluizen in het systeem. De resultaten die hieruit voortkomen worden dan gebruikt om het metamodel te schatten. (Martinelli & Schonfeld, 1995)

---

#### 2.5.4 KUNSTMATIGE NEURALE NETWERKMODELLEN

Metamodellen zijn een goed alternatief wanneer de gebruiker resultaten sneller nodig heeft. Echter is het moeilijk om een juist metamodel op te stellen wanneer het systeem complexer is. Hiervoor is een kunstmatig of artificieel neurale netwerkmodel, ook wel artificieel verbindende systemen of parallel verdeelde verwerkingseenheden genoemd, een beter alternatief (Kim & Schonfeld, 1995). De origine ligt in de menswetenschappen: de hersenen worden voorgesteld als een netwerk waarin neuronen zijn verbonden met zenuwen en andere neuronen (Feldman & Ballard, 1992). De benadering met een neurale netwerk beslaat in principe de meest elementaire onderdelen zoals datacompressie, voorspelling, besluitvormingsproces en controle en optimalisatie. (Kim & Schonfeld, 1995).

Uiteraard is een algemeen beeld niet genoeg om tot resultaten te komen voor het schatten van aankomst-, bedienings- of wachttijden. Het model van Kim & Schonfeld (1995) is een goed voorbeeld van een artificieel neurale netwerkmodel waarin de bedieningstijden van een sluis worden geschat. Het gaat om een netwerk dat bestaat uit minstens drie lagen: een input laag van neuronen, een output laag en een of meer verborgen lagen tussen deze twee in. Elk neuron uit een bepaalde laag is verbonden met de neuronen uit de volgende laag. Om het netwerk te optimaliseren wordt gebruik gemaakt van een algoritme om voorspellingen te doen over de bedieningstijden. De validatie van het model gebeurt door de gegevens op te delen in twee datasets. Op basis van de eerste wordt het model ontwikkeld en vervolgens wordt het model getest op de tweede dataset. Vervolgens werd het netwerkmodel vergeleken met twee regressiemodellen. Hierbij concludeerden de auteurs dat bij het netwerkmodel het absolute foutpercentage beduidend lager is zodat deze beter in staat is om juiste voorspellingen te geven (Kim & Schonfeld, 1995). Het nadeel is echter dat dit model enkel de bedieningstijden analyseert zodat het afhankelijkheidsaspect tussen aanliggende sluizen niet van belang is.

In een latere studie ontwierpen Zhu et al. (1999) een artificieel neurale netwerkmodel dat de wachttijden gaat schatten. Hiervoor hebben ze het model opgedeeld in vijf kleinere modellen, waarvan vier de variatie van de tijdsintervallen tussen opeenvolgende vaartuigen schatten en het overige schat de wachttijden van een sluis. De optimalisatie gebeurt eerst voor elk model afzonderlijk en vervolgens wordt dit aan elkaar verbonden door middel van een geïntegreerd netwerk. Om het netwerkmodel te testen hebben ze de resultaten vergeleken met het ontwikkelde simulatiemodel van dezelfde sluis. Hieruit blijkt dat het verschil tussen de twee slechts klein is (6,4%). Het feit dat dit artificieel neurale netwerkmodel weinig afwijkt van de resultaten van een simulatiemodel, laat zien dat dergelijk netwerkmodel een goed alternatief is. Immers heeft een simulatiemodel veel meer tijd nodig om tot resultaten te komen. Andere belangrijke voordelen zijn o.a. de mogelijkheid om flexibel om te gaan met de verdelingen van de aankomst- en

bedieningstijden en de mogelijkheid om een realistische configuratie van het netwerk aan te nemen (Zhu et al., 1999). Dit model analyseert de variantie van de tijdsintervallen van aankomende vaartuigen, zodat kan gezegd worden dat het model indirect rekening houdt met een mogelijke afhankelijkheid. Vanuit dit standpunt is dit model relevanter dan het model van Kim & Schonfeld (1995).

Kunstmatige neurale netwerken hebben als voordeel dat ze bestaande systemen realistisch kunnen nabootsen. Het nadeel is echter dat de interne werking niet gekend is. Aan de relaties tussen de drie lagen worden gewichten toegekend door het gebruikte algoritme. Het algoritme kan aangepast worden om de uitvoer te veranderen, maar de interne werking is niet gekend. Het is duidelijk dat een kunstmatig neuraal netwerk een complexe methode is. (Zhu et al., 1999)

---

#### 2.5.5 BESPREKING

In de literatuur wordt aangehaald dat elk van de vier methoden zijn voordelen heeft. Een logische vraag is welke methode het beste is om de wachttijden aan afhankelijke sluisen te modelleren. Wachtrijtheorie is zoals reeds aangehaald niet relevant omdat het geen rekening houdt met afhankelijkheid en veel onrealistische assumpties maakt. Met een simulatiemodel kan rekening worden gehouden met afhankelijkheid en tweerichtingsverkeer. Tevens is het doel van een simulatiemodel een bestaand systeem nabootsen, wat ook het doel is van de praktijkstudie in deze thesis. Metamodellen gaan aan de hand van een bestaand simulatiemodel onbekende parameters schatten. Aangezien geen bestaand simulatiemodel bestaat voor de praktijkstudie die wordt uitgevoerd is het opstellen van een metamodel geen optie. Tenslotte kan besloten worden dat een kunstmatig neuraal netwerk een te complexe methode is voor het modelleren van de wachttijden aan afhankelijke sluisen. Conclusie is dat de beste methode voor deze praktijkstudie het opstellen van een simulatiemodel is.

## HOOFDSTUK 3: PRAKTIJKSTUDIE

### 3.1 INLEIDING

In de praktijkstudie wordt met behulp van het simulatieprogramma Arena een simulatiemodel opgesteld. Hierin wordt het waterwegverkeer aan de sluizen van Wijnegem, Olen en Ham gesimuleerd. In het simulatiemodel wordt allereerst de gebruikte data beschreven en geanalyseerd. Hierbij wordt onder andere nagegaan of de aankomsten aan de sluizen kunnen worden geschat aan de hand van een statistische kansverdeling. Wanneer de aankomst- en tussenaankomsttijden niet kunnen worden beschreven door toeval, betekent dit dat de aankomsten niet kunnen beschreven worden door een bepaalde verdeling. Hieraan kan het afhankelijkheidsaspect worden gerelateerd. Namelijk wanneer een afhankelijkheid aanwezig is tussen de drie sluizen wordt verwacht dat de aankomsten niet gebaseerd zijn op toeval, en dus niet kunnen geschat worden aan de hand van een verdeling. De analyse wordt uitgevoerd met behulp van de 'Input Analyzer' tool die beschikbaar is in het simulatieprogramma Arena. Verder wordt het simulatiemodel besproken. Eerst worden de opgelegde assumpties beschreven. Hierna wordt een beschrijving gegeven van de entiteiten, attributen, variabelen en bronnen die aanwezig zijn in het simulatiemodel. Vervolgens wordt de opbouw van het model uitgelegd met behulp van illustraties om zo de herhaalbaarheid te verhogen. Aansluitend worden de belangrijke maatstaven voor de prestaties en de replicatieparameters van het model besproken. Hierna worden de simulatieresultaten besproken van het basismodel. Vervolgens wordt het basismodel aangepast naar een model met onafhankelijke aankomsten als invoergegevens om zo de afhankelijkheid van de sluizen te identificeren. Hier bovenop wordt een sensitiviteitsanalyse uitgevoerd. Dit houdt een analyse in van de invloed op wachttijden en andere factoren ten gevolge van veranderingen in het model. Ten slotte worden de beperkingen van het model besproken en suggesties voor verder onderzoek gegeven.

### 3.2 ANALYSE VAN DE DATA

#### 3.2.1 ALGEMEEN

De data die gebruikt worden in het simulatiemodel zijn afkomstig van NV De Scheepvaart. De relevante data bestaat uit de aankomsttijden, wachttijden, bedieningstijden en de afmetingen (lengte en breedte) van schepen die in 2013 één van de drie sluizen (Wijnegem, Olen en Ham) passeerden. Bovendien is informatie over de vaarrichting beschikbaar zodat de gegevens kunnen worden opgedeeld in stroomopwaartse en stroomafwaartse richting. De gegevens zijn beschikbaar voor alle maanden in het jaar 2013. Echter wordt slechts één maand gekozen om het simulatiemodel vlotter te kunnen laten verlopen. Aangezien naast afhankelijkheid tussen sluizen ook wachttijden belangrijk zijn, wordt verkozen om de maand maart te onderzoeken. De drukste maand van het jaar 2013 is mei, maar in deze maand vallen zodanig veel feestdagen op

weekdagen dat de mogelijkheid bestaat dat dit geen representatief beeld geeft. Dit omdat een hoger volume verkeer over een minder aantal werkdagen is verspreid. Daarom wordt voor de tweede drukste maand gekozen, namelijk maart 2013. Aangezien in het simulatiemodel enkel de aankomsten worden ingelezen aan de twee uiterste sluisen, namelijk Wijnegem en Ham, wordt enkel de data van Wijnegem stroomopwaarts en Ham stroomafwaarts geanalyseerd. Zoals ook in de literatuurstudie is beschreven bestaat de sluisinfrastructuur aan de drie sluiscomplexen uit twee gewone sassen en één duwvaartsas. Deze drie sluiskamers hebben als afmetingen respectievelijk 16 m x 136 m of 2176 m<sup>2</sup> en 24 m x 200 m of 4800 m<sup>2</sup>.

---

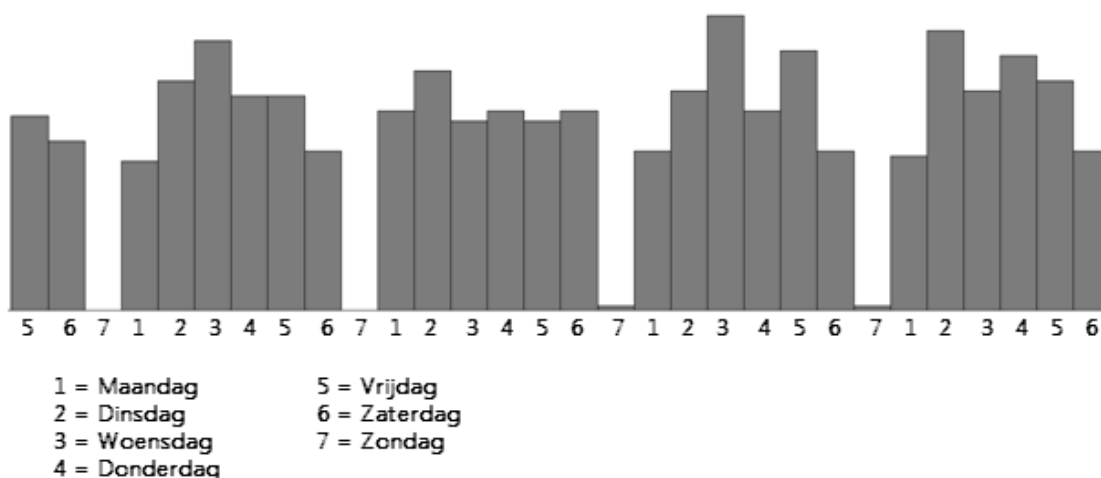
### 3.2.2 AANKOMSTTIJDEN

De aankomsttijden die geregistreerd werden door NV De Scheepvaart zijn de tijdstippen waarop vaartuigen de wettelijke 500m paal passeren. Dit werd reeds beschreven in de sectie die handelt over de prioriteitsregels, 2.1.4. Uit de aankomstendata blijkt duidelijk dat sluismeesters de vaartuigen bundelen tot één groep om ze vervolgens samen in één keer te versassen. De redenering achter het bundelen is dat onder andere minder tijd nodig is om meer schepen tegelijk te versassen ten opzichte van verschillende versassingen. Dit wil zeggen dat de sluis een hogere benuttinggraad heeft en bijgevolg de sluiscapaciteit efficiënter wordt ingezet. Om de schepen samen te versassen is het uiteraard nodig dat ze relatief kort op elkaar volgen. Dit impliceert dat de vaartuigen in groepen worden versast, omdat ze in groepen aan de sluis aankomen. Dit is tevens de idee achter de afhankelijkheid tussen sluisen. Bij afhankelijke sluisen komen de schepen die samen versast worden ongeveer op hetzelfde moment aan bij de volgende sluis. Hierbij geldt de voorwaarde dat de afstand tussen de twee sluisen klein genoeg is, zodat de schepen zich niet willekeurig kunnen ordenen. Het is ook mogelijk dat de schepen aan gelijke snelheid varen over een langere afstand zodat ze nog steeds tegelijk aankomen aan de volgende sluis. Zoals in de literatuurstudie reeds werd aangehaald zijn de afstanden tussen Wijnegem en Olen en Olen en Ham respectievelijk 23,9 km en 18,7 km. Het is niet duidelijk of deze afstanden relatief lang of kort zijn en of de vaartuigen aan een vergelijkbare snelheid hebben gevaren. Aangezien de aankomsttijden in groepen kunnen worden verdeeld, is de hypothese dat een afhankelijkheid aanwezig is. Bijgevolg is de verwachting dat het niet mogelijk is om met een statistische kansverdeling de aankomst- tussenaankomsttijden te beschrijven. Dit wordt nagegaan met behulp van de 'Input Analyzer' tool in het programma Arena. Wanneer een bepaalde statistische verdeling volgens deze tool significant is, betekent dit dat de nulhypothese van de werkelijke aankomsten en de kansverdeling gelijk zijn aan elkaar en niet worden verworpen op het 1%, 5% of 10% significantieniveau.

Vooraleer de aankomsttijden in de Input Analyzer kunnen worden ingeladen, moeten ze gerangschikt en vervolgens geconverteerd worden naar een getalwaarde. Dit wordt gedaan door eerst de gegevens op te splitsen in stroomafwaarts en stroomopwaarts. Vervolgens gaan we de aankomsten met behulp van Microsoft Excel omzetten in uren. Dit op zo een manier dat de aankomsttijden op 1 maart worden geklasseerd met een getalwaarde tussen nul en 24, op 2 maart

24-48, ..., op 31 maart 720-744. Bijvoorbeeld: het eerste vaartuig op 1 maart passeerde de sluis om 0:46:25, wat in getallen 0.774 wordt. Wanneer alle aankomsten zijn geconverteerd naar een getalwaarde, kunnen ze worden ingelezen in de Input Analyzer waar vervolgens wordt gezocht of een significante fit bestaat van een statistische kansverdeling met de werkelijke aankomstendata.

In figuur 6 is het histogram te zien voor de aankomsttijden in Ham voor de stroomafwaarts varende schepen en in tabel 4 de bijhorende samenvatting. Aangezien Wijnegem de meest stroomafwaarts gelegen sluis is op het Albertkanaal, zijn de stroomafwaartse data de aankomsttijden van de schepen die in de richting van Wijnegem varen. Het histogram is op de horizontale as ingedeeld volgens 30 intervallen waarbij elk interval één dag van de maand maart 2013 voorstelt. De verticale as geeft het aantal schepen weer dat op de desbetreffende dag door de sluis is gepasseerd. Het histogram begint op vrijdag 1 maart 2013 en eindigt op zaterdag 30 maart 2013. De maand maart telt 31 dagen maar op zondag 31 maart 2013 vond de feestdag Pasen plaats, waarop in beide vaarrichtingen geen schepen werden geregistreerd. Op zondagen werden beduidend minder vaartuigen geregistreerd. Dit omdat op zon- en feestdagen het sluispersoneel enkel met de nachtpost werkt, d.w.z. de sluis wordt die dag enkel bediend van 22u tot middernacht. Hierop bestaan twee uitzonderingen. Ten eerste kan een passagiersschip een specifieke schutting aanvragen. Ten tweede wordt een schutting uitgevoerd voor beroepsschepen wanneer een economische noodzaak aanwezig is. Economische noodzaak heeft hier als betekenis dat het schip moet worden geladen of gelost zodat het bedrijf niet stilvalt. Het feit dat vaartuigen geregistreerd zijn in kleine aantallen op deze dagen zijn bijgevolg geen fout in de data. Vaartuigen zijn immers enkel de sluis gepasseerd in een tijdspanne van slechts twee uur (22u tot middernacht). Op Pasen, 31 maart, zijn ook geen vaartuigen gepasseerd na 22u omdat deze dag gevolgd werd door een andere feestdag, Paasmaandag. Om deze reden werd het interval aangepast aan 30 dagen in plaats van 31 dagen. Het histogram laat zien dat bepaalde weekdays zoals dinsdag en woensdag de drukste dagen zijn. In drie van de vier weken zijn de maandagen en zaterdagdag relatief te beschrijven als middelmatig.



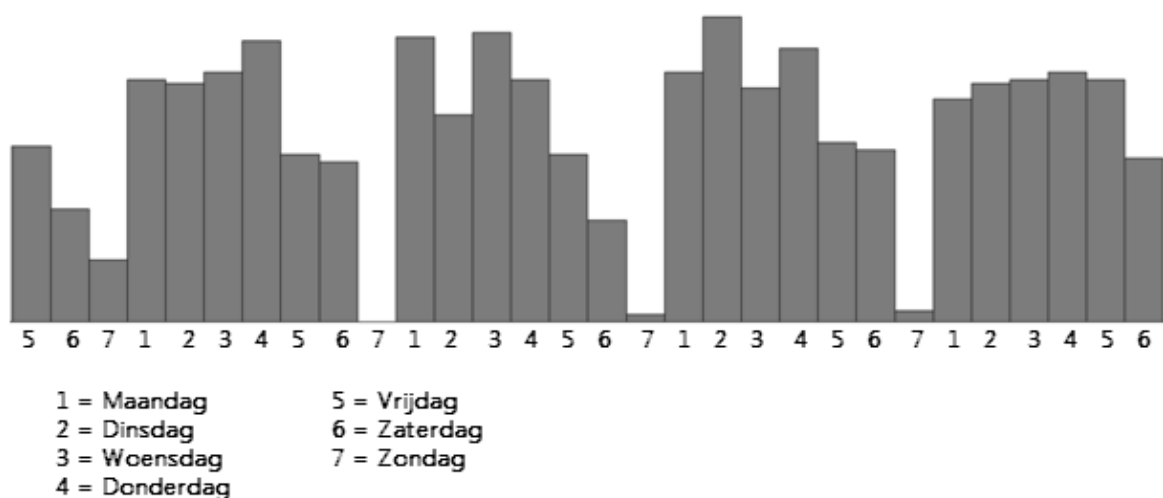
**Figuur 6: Histogram aankomsttijden Ham stroomafwaarts (richting Wijnegem)**



<i>Samenvatting gegevens</i>	<i>Samenvatting histogram</i>
Aantal data : 1086	Histogram bereik : 0 to 720
Minimum waarde : 0.034	Aantal intervallen : 30
Maximum waarde : 714	

**Tabel 4: Samenvatting aankomsttijden Ham stroomafwaarts (richting Wijnegem)**

Wanneer we de data van stroomopwaarts varende schepen in Wijnegem in een histogram weergeven, zien we in figuur 7 dat wederom een aan figuur 6 gelijkaardig patroon te herkennen is voor de weekdays. Echter is het nu opvallend dat enerzijds de eerste zondag ten opzichte van andere zondagen druk is, en anderzijds dat de zaterdagen een beduidend lagere trafiek kennen dan stroomafwaarts. De eerste zondag werden 18 vaartuigen versast, wat relatief een groot aantal is voor een zondag. Hiervoor is geen specifieke verklaring. Voor de lagere trafiek op zaterdagen is een mogelijke verklaring het volgende: schepen werken vaak in opdracht van bedrijven zodat ze zijn verbonden aan een bedrijf. De aankomsten aan Wijnegem zijn daarom mogelijk hoger op de werkdagen en lager op de overige dagen. Voor een schip dat reeds zijn lading heeft gelost, geldt niet noodzakelijk hetzelfde. Het kan namelijk leeg terugvaren of opnieuw een lading opnemen zodat het efficiënter wordt ingezet. Voor een schip vanuit de Haven van Antwerpen is het niet logisch dat het leeg zou varen in stroomopwaartse richting. Omwille van deze reden is het mogelijk dat zaterdagen stroomopwaarts minder druk zijn dan stroomafwaarts. Omdat uit beide histogrammen blijkt dat zondagen zo goed als geen verkeer hebben gekend, worden deze dagen uit de database verwijderd. Voor zaterdagen wordt geopteerd om ze in de dataset te behouden. Dit omdat ze in stroomafwaartse richting gekend zijn door een hogere trafiek dan maandagen en in stroomopwaartse richting nog steeds middelmatig zijn. De samenvatting voor het histogram wordt gegeven in tabel 5.



**Figuur 7: Histogram aankomsttijden Wijnegem stroomopwaarts (richting Ham)**

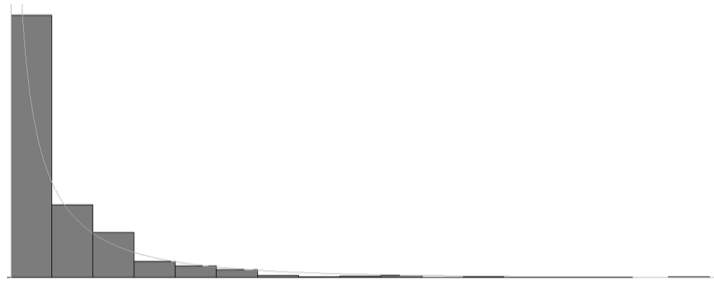
<i>Samenvatting gegevens</i>	<i>Samenvatting histogram</i>
Aantal data : 1479	Histogram bereik : 0 to 720
Minimum waarde : 0.774	Aantal intervallen : 30
Maximum waarde : 713	

**Tabel 5: Samenvatting aankomsttijden Wijnegem stroomopwaarts (richting Ham)**

### 3.2.3 TUSSENAANKOMSTTIJDEN

Vervolgens wordt onderzocht of de tussenaankomsttijden duiden op afhankelijkheid. Wanneer de aankomsten afhankelijk zijn van een andere sluis, wordt verwacht dat ze niet kunnen beschreven worden door een statistische verdeling. De data die betrekking hebben op zondagen, worden verwijderd aangezien in de histogrammen uit figuur 6 & 7 duidelijk is dat op deze dagen slechts een beperkte trafiek de sluis passeert. Aangezien de zondagen worden verwijderd, moeten de tussenaankomsttijden worden aangepast. De tussenaankomst zal immers minstens met 24 stijgen omdat een volledige dag die normaal ertussen zit werd verwijderd. Dit wordt gecorrigeerd door de eerste tussenaankomst na de zondag te verminderen met 24 uur. Dit wil zeggen dat we doen alsof maandag op zaterdag volgt. Om de statistische significantie van een kansverdeling te bepalen wordt de chi-kwadraat test gebruikt. De Kolmogorov-Smirnov test, die ook door de Input Analyzer wordt gegeven, laten we vallen. De reden is dat deze test controleert op een afwijking van de getoetste verdeling ten opzichte van andere verdelingen. Dit is namelijk niet van belang voor dit onderzoek.

In figuur 8 worden de stroomafwaartse tussenaankomsttijden in Ham in een histogram weergegeven. Op de horizontale as staan de tussenaankomsten, opgedeeld in 24 intervallen. Op de verticale as staan het aantal schepen. De curve beschrijft de Weibull verdelingscurve. De Input Analyzer in Arena heeft deze curve als beste fit gekozen voor het histogram. D.w.z. dat de tussenaankomsttijden het best worden beschreven door een Weibull kansverdeling. Echter betekent dit niet noodzakelijk dat deze verdeling een goede fit is voor de data. Tabel 6 geeft een samenvatting van de verdeling en de data. Hierin zien we dat p-waarde voor de Chi Kwadraat test kleiner is dan 0.005, zodat de Weibull verdeling niet significant is op het 1% significantieniveau. Dit houdt in dat de voorgestelde verdeling en de geobserveerde tussenaankomsttijden niet overeenstemmen waardoor we mogen concluderen dat de Weibull verdeling de stroomafwaartse tussenaankomsttijden niet goed benadert.



**Figuur 8: Histogram tussenaankomsttijden Ham stroomafwaarts**

Verdeling		Data	
Verdeling:	Weibull	Aantal Data	= 1086
Uitdrukking:	-0.001 + WEIB(0.415, 0.605)	Min Data Waarde	= 0
Kwadr. fout:	0.001512	Max Data Waarde	= 6.27
<i>Chi Square Test</i>		Gemiddelde	= 0.463
		Standaardafwijking	= 0.695
Aantal intervallen	= 11		
Vrijheidsgraden	= 8		
Test Statistiek	= 47.8		
P-waarde	< 0.005		

**Tabel 6: Samenvatting tussenaankomsttijden Ham stroomafwaarts**

Voor de stroomopwaartse tussenaankomsttijden voeren we hetzelfde uit. In bijlage 1 staat het histogram voor de tussenaankomsttijden met de bijhorende samenvattende gegevens. De geobserveerde gegevens kunnen het best beschreven worden aan de hand van een Betaverdeling. Deze gefitte verdeling is opnieuw niet significant op het 1% significantieniveau (p-waarde <0.005), zodat ze de werkelijke tijden niet goed benadert.

Voor beide stroomrichtingen kunnen we besluiten dat geen gepaste statistische verdeling bestaat voor de beschrijving van de aankomsttijden voor maart 2013. Dit was te verwachten omwille van twee redenen. De eerste is dat uit de literatuurstudie reeds bleek dat door Dai & Schonfeld (1998) geen gepaste verdeling kon gevonden worden die een consistente fit geeft voor de aankomsttijden aan de sluizen van de binnenvaart in de Verenigde Staten. De tweede is dat een vorm van afhankelijkheid wordt verwacht aan sluizen, wat bijgevolg impliceert dat verwacht wordt dat geen kansverdeling de aankomstendata kan beschrijven.

### 3.2.4 TUSSENAANKOMSTEN VAN GROEPEN

Uit de aankomsttijden blijkt dat de vaartuigen vaak in groep worden versast. De verwachting is dan ook dat schepen ongeveer tegelijkertijd aankomen, door een mogelijke aanwezigheid van afhankelijkheid. Een logische volgende stap is daarom de aankomstgegevens in groepen te onderzoeken. Zo kan nagegaan worden of een statistische kansverdeling de tussenaankomsttijden van deze groepen kan beschrijven. Allereerst is een definitie nodig van een groep: een groep wordt gevormd wanneer minstens twee vaartuigen in dezelfde richting naar eenzelfde sluis varen en hierbij binnen een bepaald tijdsinterval op elkaar volgen. Uit de data is af te leiden dat schepen worden gegroepeerd tot een maximaal tijdsverschil van 45 minuten. Dit is nochtans een lange tijd en is slechts eenmalig waardoor het eerder een uitschieter is. De volgende maximale tijd dat gewacht wordt op een schip bedraagt ongeveer 36 minuten. Schepen zullen daarom in het simulatiemodel gegroepeerd worden wanneer ze binnen 36 minuten, oftewel 0,6 uren, in dezelfde richting naar eenzelfde sluis varen.

De groepen worden met de Input Analyzer geanalyseerd om zo opnieuw een histogram met een voorgestelde gefitte verdeling te bekomen, gegeven in figuur 9. Om de tussenaankomsttijden van de groepen te analyseren wordt enkel de aankomsttijd van het eerste schip van de groep behouden in de data. Met andere woorden, we maken de assumptie dat alle schepen van eenzelfde groep op hetzelfde tijdstip aankomen. De tijd tussen twee groepen is bijgevolg de tijd tussen het eerste schip van een groep en het eerste schip van de vorige groep. De voorgestelde statistische verdeling is een lognormale verdeling. Uit tabel 7 kan opnieuw afgelezen worden dat de verdeling niet statistisch significant is op het 1% significantieniveau ( $p$ -waarde  $< 0.005$ ). Voor de stroomopwaartse vaarrichting in Wijnegem wordt dezelfde analyse uitgevoerd. Het histogram en de samenvatting van de gegevens worden gegeven in bijlage 2. De voorgestelde verdeling betreft een Beta verdeling. Echter is de  $p$ -waarde opnieuw kleiner dan 0.005 zodat de kansverdeling niet significant is op het 1% significantieniveau.



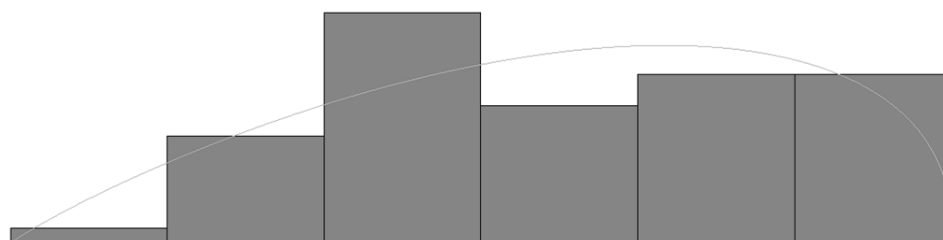
**Figuur 9: Histogram tussenaankomsttijden van groepen, Ham stroomafwaarts**

Verdeling		Data	
Verdeling:	Beta	Aantal Data	= 789
Uitdrukking:	$-0.001 + 9 * \text{BETA}(0.983, 11.4)$	Min Data Waarde	= 0
Kwadr. fout:	0.001999	Max Data Waarde	= 8.21
<i>Chi Square Test</i>		Gemiddelde	= 0.759
Aantal intervallen	= 9	Standaardafwijking	= 0.892
Vrijheidsgraden	= 6		
Test Statistiek	= 21.6		
P-waarde	< 0.005		

**Tabel 7: Samenvatting tussenaankomsttijden van groepen, Ham stroomafwaarts**

### 3.2.5 ANALYSE PER DAG

Aangezien geen gepaste verdeling bestaat voor de aankomsten te beschrijven over de periode van één maand, wordt een analyse toegepast over de periode van één dag, namelijk woensdag. Deze dag werd willekeurig uitgekozen. Het histogram wordt weergegeven in figuur 10. De zes intervallen beschrijven elk een periode van vier uur, zodat in totaal een periode van 24 uur wordt weergegeven. Uit tabel 8 is duidelijk te zien dat de aankomsttijden in Ham, op woensdag 6 maart 2013, kunnen worden beschreven door een Beta verdeling. De p-waarde is namelijk 0.156 zodat de fit van de verdeling significant is op het 10% significantieniveau. Dit wil zeggen dat de aankomsten niet afhankelijk zijn. Dit is tegen de verwachtingen in, maar de mogelijke reden ligt in het feit dat de afstand tussen de sluis van Ham en de sluis van Diepenbeek een lange afstand is. Door deze lange afstand is het namelijk mogelijk dat schepen de kans krijgen om zich willekeurig te gaan rangschikken, met als gevolg dat het afhankelijkheidsaspect niet langer significant aanwezig is. In bijlage 3 zijn de resultaten van dezelfde analyse voor de stroomopwaartse richting in Wijnegem weergegeven. Opnieuw wordt een Beta verdeling voorgesteld, maar de fit is enkel significant op het 1% significantieniveau (p-waarde = 0.0233).



**Figuur 10: Histogram tussenaankomsten op woensdag 6 maart 2013, Ham stroomafwaarts**

<i>Verdeling</i>		<i>Data</i>	
Verdeling:	Beta	Aantal Data	= 54
Uitdrukking:	$24 * \text{BETA}(1.91, 1.4)$	Min Data Waarde	= 0.763
Kwadr. fout:	0.014314	Max Data Waarde	= 23.4
		Gemiddelde	= 13.8
<i>Chi Square Test</i>		Standaardafwijking	= 5.71
Aantal intervallen	= 5		
Vrijheidsgraden	= 2		
Test Statistiek	= 3.92		
P-waarde	= 0.156		

**Tabel 8: Samenvatting gegevens woensdag 6 maart 2013, Ham stroomafwaarts**

Aangezien de aankomsten van woensdag 6 maart 2013 in beide vaarrichtingen kunnen worden beschreven door een Beta verdeling met een bepaalde significante fit, wordt dezelfde verdeling toegepast op de aankomsten van woensdag 13 maart 2013. De reden waarom opnieuw voor een woensdag wordt geopteerd, is de mogelijke aanwezigheid van een trend en mogelijk sneller een significante. Voor Ham worden de resultaten gegeven in bijlage 4, voor Wijnegem in bijlage 6.

De stroomafwaartse aankomsten in Ham kunnen op woensdag 13 maart 2013 door dezelfde Beta verdeling worden beschreven, maar het niveau van significantie is nu beperkt tot het 5% significantieniveau ( $p$ -waarde = 0.0836). Een Beta verdeling met andere parameters vertoont een veel betere fit, zoals te zien is in bijlage 4. Het is duidelijk dat de  $p$ -waarde reeds sterk gedaald is. Omdat dezelfde verdeling nu reeds op twee woensdagen significant is op het 5% significantieniveau, wordt de analyse ook getest op een andere willekeurige dag, namelijk op vrijdag 8 maart 2013. De resultaten zijn weergegeven in bijlage 5. Uit de tabel blijkt duidelijk dat geen enkele verdeling een significante fit vertoont voor de aankomstgegevens. Aangezien de Input Analyzer altijd de beste fit voorstelt en de  $p$ -waarde reeds  $< 0.005$ , kan tevens geconcludeerd worden dat de Beta verdeling ook geen significante fit geeft. Deze analyse van drie dagen elk afzonderlijk, stuurt ons in de richting van de conclusie van Dai & Schonfeld (1998). Namelijk dat geen consistente fit kan worden gevonden tussen de werkelijke aankomsten en een bepaalde statistische kansverdeling.

Voor stroomopwaarts zullen we dezelfde dagen analyseren als stroomafwaarts. Voor woensdag 13 maart is de voorgestelde verdeling opnieuw een Beta verdeling, maar de  $p$ -waarde is kleiner dan 0,005 zodat deze op geen enkel significantieniveau een significante fit vertoont. Opnieuw mag geconcludeerd worden dat ook de Beta verdeling die van toepassing is op woensdag 6 maart niet significant is, aangezien de  $p$ -waarde reeds kleiner is dan 0,005 voor de beste fit. Tenslotte is in bijlage 7 het histogram en bijhorende samenvatting gegeven voor de analyse van vrijdag 8 maart

2013. De Beta verdeling heeft nu een fit die net niet significant is op het 5% significantieniveau. De Input Analyzer stelt de Normaalverdeling als beste fit voor met een p-waarde van 0.244, zodat deze fit significant is op het 10% significantieniveau.

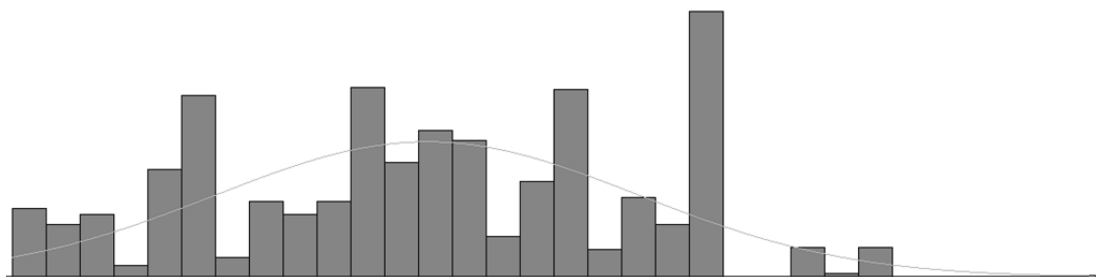
Wanneer we beide stroomrichtingen bekijken, wordt het duidelijk dat op bepaalde dagen de aankomsten kunnen worden beschreven door een statistische kansverdeling. Echter is deze verdeling vooral geschikt voor slechts één specifieke dag. We kunnen bijgevolg concluderen dat de aankomstendata niet consistent kunnen beschreven worden door een kansverdeling. Omwille van deze reden wordt gekozen om de werkelijke aankomstendata in het simulatiemodel te gebruiken.

---

### 3.2.6 ANALYSE VAN SCHIPAFMETINGEN

Om te bepalen of de afmetingen van de vaartuigen kunnen worden beschreven door een statistische verdeling, wordt een analyse opgemaakt van de oppervlaktes van de schepen. De oppervlaktes worden berekend door de lengte en de breedte van de schepen met elkaar te vermenigvuldigen. Het histogram voor de afmetingen van de schepen die de sluis van Ham in stroomafwaartse richting passeerden in maart 2013, is in figuur 11 en de bijhorende samenvatting in tabel 9 weergegeven. De door de Input Analyzer voorgestelde verdeling is een Normaalverdeling die niet significant is op alle drie de significantieniveaus ( $p$ -waarde  $< 0.005$ ). De afmetingen van Wijnegem stroomopwaarts zijn weergegeven in bijlage 8. Opnieuw is de voorgestelde verdeling niet significant.

Aangezien voor beide richtingen geen kansverdeling significant is, mag besloten worden dat de werkelijke oppervlaktes niet kunnen worden benaderd aan de hand van een statistische verdeling. Daarom zullen de werkelijke oppervlaktes worden gebruikt in het simulatiemodel.



**Figuur 11: Histogram afmetingen schepen, Ham stroomafwaarts**

<i>Verdeling</i>		<i>Data</i>	
Verdeling:	Normaal	Aantal Data	= 1086
Uitdrukking:	NORM(772, 362)	Min Data Waarde	= 62.3
Kwadr. fout:		Max Data Waarde	= 1917
<i>Chi Square Test</i>		Gemiddelde	= 772
Aantal intervallen	= 26	Standaardafwijking	= 362
Vrijheidsgraden	= 23		
Test Statistiek	= 768		
P-waarde	< 0.005		

**Tabel 9: Samenvatting afmetingen schepen, Ham stroomafwaarts**

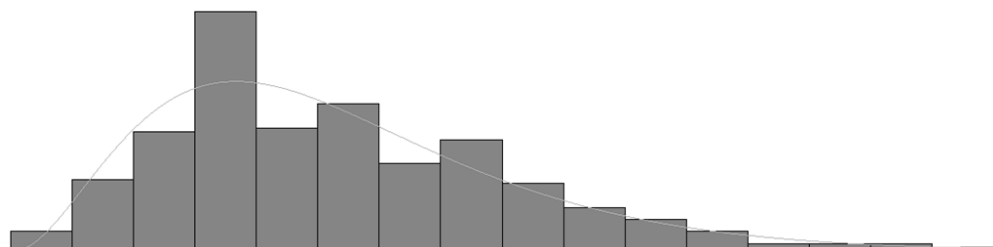
### 3.2.7 BEDIENINGSTIJDEN

De bedieningstijden spelen een belangrijke rol in het aanbod van een sluis, oftewel de totale tijd die nodig is om schepen te versassen. Daarom wordt een analyse uitgevoerd op de bedieningstijden voor Ham stroomafwaarts en Wijnegem stroomopwaarts. In het simulatiemodel zal enkel de Duwvaartsluis worden gesimuleerd, zodat enkel de bedieningstijden van deze sluis van belang zijn voor een analyse. Bovendien worden schepen in groepen versast, zodat de bedieningstijden per groep worden geanalyseerd. Aangezien de zes sluizen op het Albertkanaal een nagenoeg identieke infrastructuur hebben, is aan te nemen dat de bedieningstijden voor alle zes de Duwvaartsluizen hetzelfde zijn. Uit een korte meting aan de sluis van Genk zijn een aantal gegevens gekend: het openen en sluiten van de deuren duurt ongeveer vier en een halve minuut en het waterpeil op het juiste niveau brengen duurt 12 minuten. Deze tijden zijn samengevat in tabel 10. In totaal zou het versassen van Duwvaartsluis daarom minstens 16,5 minuten duren. Om toch een foutterm op te nemen in de berekening kunnen we zeggen dat een versassing minstens 12 minuten zou moeten duren. In de beschikbare data hebben een aantal bedieningstijden een waarde van slechts enkele seconden of minuten. Deze waarden worden verondersteld als onrealistisch en dus fout te zijn, zodat ze uit de dataset worden verwijderd. In figuur 12 is het histogram weergegeven voor de bedieningstijden van de groepen in Wijnegem, stroomopwaarts. Uit tabel 11 wordt duidelijk dat de Gamma verdeling een significante fit geeft voor de bedieningstijden, maar dit slechts op het 1% significantieniveau (p-waarde = 0,034). Normaliter zou een verdeling significant moeten zijn op het 5% significantieniveau om een overtuigende fit te geven. Om deze reden wordt geopteerd om de werkelijke bedieningstijden in het model in te lezen in de plaats van een statistische kansverdeling.



	Deuren	Waterpeil	Totaal
DS	4,5	12	16,50
NS	3,5	9	12,50
MS	3,5	9	12,50

**Tabel 10: Tijden voor openen/sluiten van sluisdeuren en waterpeil te veranderen**



**Figuur 12: Histogram bedieningstijden, Wijnegem stroomopwaarts**

Verdeling		Data	
Verdeling:	Gamma	Aantal Data	= 279
Uitdrukking:	12 + GAMM(2.96, 3.17)	Min Data Waarde	= 12.1
Kwadr. fout:	0.007168	Max Data Waarde	= 39.4
<i>Chi Square Test</i>		Gemiddelde	= 21.4
Aantal intervallen	= 10	Standaardafwijking	= 4.98
Vrijheidsgraden	= 7		
Test Statistiek	= 15.3		
P-waarde	= 0.034		

**Tabel 11: Samenvatting bedieningstijden Wijnegem stroomopwaarts**

### 3.2.8 VAARTIJDEN TUSSEN TWEE SLUIZEN

Aangezien meer dan één sluis wordt gemodelleerd, moeten de vaartijden tussen twee sluisen in juist worden gemodelleerd. Deze tijden zijn belangrijk omdat ze een groot onderdeel uitmaken van het afhankelijkheidsaspect van opeenvolgende sluisen. Wanneer de tijden voor de meeste schepen ongeveer gelijk zijn, wil dit zeggen dat schepen aan een gelijkaardige snelheid varen. Bijgevolg zal het aankomstenritme gelijkaardig zijn aan het vertrekritme aan de vorige sluis, m.a.w. afhankelijke aankomsten. Wanneer daarentegen de vaartijden zeer uiteenliggend zijn, krijgen de schepen de opportuniteit om zich willekeurig te rangschikken, d.w.z. onafhankelijke aankomsten. Om deze reden is een analyse nodig van de vaartijden tussen Ham en Olen enerzijds, en Olen en Wijnegem anderzijds.

### 3.2.8.1 Relatie schipgrootte en vaartijd

Allereerst wordt onderzocht of er een onderscheid is tussen de vaartijd en de grootte van schepen. Dit omdat intuïtief een onderscheid in vaartijd te verwachten is tussen grotere schepen en kleinere schepen. Uit de data kan afgeleid worden dat grote schepen een oppervlakte lijken te hebben van meer dan ongeveer 1000 m<sup>2</sup>. Hierbij moet opgemerkt worden dat het gaat om de oppervlaktes berekend volgens de oppervlakteformule van een rechthoek. In werkelijkheid zal dit dus waarschijnlijk afwijken van 1000 m<sup>2</sup>. De verwachting is dat een groter schip langer doet over eenzelfde afstand als een schip van kleinere grootte. Neem  $x$  het steekproefgemiddelde van de grotere schepen en  $y$  het steekproefgemiddelde van de overige schepen. De steekproef wordt genomen over drie willekeurige dagen, 12,13 en 14 maart 2013. Het doel is om na te gaan of de gemiddeldes van de twee populaties significant van elkaar afwijken aan de hand van een t-test. Daarom is de nulhypothese en alternatieve hypothese:

$$H_0: \mu = \mu_x - \mu_y = 0$$

$$H_a: \text{niet } H_0$$

In tabel 12 wordt de samenvatting van t-test, berekend met Excel, weergegeven. Hieruit blijkt dat de t-waarde (1,72) tussen het tweezijdige kritieke gebied (-1,99 en +1,99) gelegen is. Daarom wordt de nulhypothese, waarvan de gemiddelde vaartijd van grote schepen gelijk is aan die van kleine schepen, niet verworpen op het 5% significantieniveau. De vaartijden mogen dus niet apart geanalyseerd worden gezien ze niet significant verschillend zijn van elkaar. De voorwaarde van een t-test is dat beide steekproeven uit een normale verdeling komen en onafhankelijk zijn van elkaar. We veronderstellen dat dit zo is.

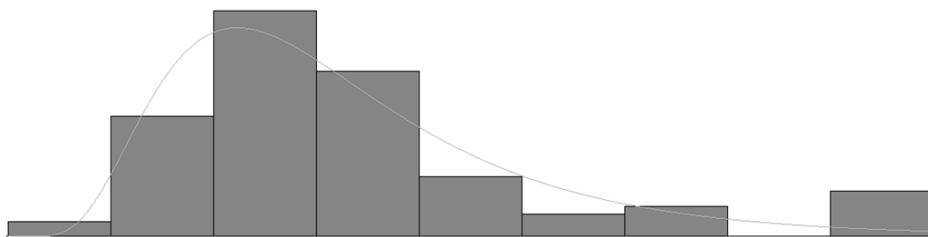
<i>Vaartijden</i>	<i>Grote schepen</i>	<i>Kleine schepen</i>
Gemiddelde	1,390833333	1,288644068
Variantie	0,124881333	0,054711923
Waarnemingen	48	59
Schatting van verschil tussen gemiddelden	0	
Vrijheidsgraden	78	
Alpha	5%	
T- statistische gegevens	1,720198304	
P(T<=t) tweezijdig	0,089361739	
Kritiek gebied van T-toets: tweezijdig	1,990847036	

**Tabel 12: Samenvatting t-test voor vaartijden (vaartijden in uren)**

### 3.2.8.2 Analyse vaartijden

Eerst doen we een analyse van drie willekeurig gekozen dagen, namelijk 1,2 en 4 maart 2013. Om de vaartijden tussen twee sluizen te bekomen, wordt gebruik gemaakt van de Excel functie

“vlookup”. Met deze functie kan de naam van het schip worden opgezocht in een verticale lijst van schepen die zijn vertrokken aan een vorige sluis en vervolgens de bijbehorende vertrektijd weergegeven. Het verschil tussen de aankomsttijd aan de sluis en de vertrektijd aan de vorige sluis is de tijd die het schip nodig heeft om van de ene naar de andere sluis te varen. De analyse van de drie dagen afzonderlijk wijst uit dat geen geschikte verdeling bestaat voor de vaartijden. Voor alle drie is de p-waarde kleiner dan 0.005. Echter wanneer de drie dagen samen worden geanalyseerd geeft de Input Analyzer een verdeling die significant is op het 10% significantieniveau (p-waarde = 0.235). Het histogram is weergegeven in figuur 13 en de bijbehorende samenvatting in tabel 13. Er moet worden opgemerkt dat dit slechts een analyse is van drie dagen en mogelijk een vertekend beeld geeft. Daarom wordt de analyse uitgebreid tot en met donderdag 7 maart 2013, zodat het een week omvat. De analyse is weergegeven in bijlage 9. Het is duidelijk dat opnieuw de Lognormale kansverdeling, met dezelfde parameters als de verdeling in figuur 13, significant is op het 10% significantieniveau met een p-waarde van 0,727. Een belangrijke opmerking is dat vier uitschieterende waarden werden verwijderd. De waarden van deze uitschieters zijn 8,017; 3,234; 3,987 en 6,620. De reden hiervoor is dat enerzijds deze vier waarden zeer hoog zijn ten opzichte van de overige 211 vaartijden. Het is dan ook aan te nemen dat deze vier schepen mogelijk een tussenstop hebben gemaakt. Dezelfde verdeling wordt toegepast op het histogram van 1 maart tot en met 14 maart, d.w.z. een periode van twee weken. In bijlage 10 is te zien dat de verdeling nog steeds significant is op het 10%. Tenslotte wordt de verdeling over de volledige maand maart getest. In bijlage 13 is de analyse gegeven. Het is duidelijk dat de Lognormale verdeling nog steeds een significante fit heeft met de vaartijden (p-waarde = 0.317), weliswaar met een klein verschil in parameters. Indien de verdeling met dezelfde parameters wordt toegepast ( $0.62 + \text{LOGN}(0.676, 0.277)$ ), is de fit beperkt tot een significantieniveau van 5%. We mogen concluderen dat de vaartijden tussen Ham en Olen kunnen benaderd worden door een Lognormale verdeling. Aangezien stroomafwaarts en stroomopwaarts mogelijk kunnen verschillen in vaartijd moet ook een analyse worden opgemaakt voor de vaartijden in stroomopwaartse richting. Deze is weergegeven in bijlage 12. Het betreft een Erlang verdeling die significant is op het 10% significantieniveau (p-waarde > 0.75).



**Figuur 13: Histogram vaartijden 1 maart t.e.m. 4 maart, Ham – Olen stroomafwaarts**

<i>Verdeling</i>		<i>Data</i>	
Verdeling:	Lognormaal	Aantal Data	= 91
Uitdrukking:	0.71 + LOGN(0.592, 0.325)	Min Data Waarde	= 0.849
Kwadr. fout:	0.009917	Max Data Waarde	= 2.18
<i>Chi Square Test</i>		Gemiddelde	= 1.3
Aantal intervallen	= 5	Standaardafwijking	= 0.324
Vrijheidsgraden	= 2		
Test Statistiek	= 2.95		
P-waarde	= 0.235		

**Tabel 13: Samenvatting vaartijden 1 maart t.e.m. 4 maart, Ham – Olen stroomafwaarts**

Voor de vaartijden tussen Wijnegem en Olen wordt de volledige maand maart 2013 geanalyseerd. Voor het histogram en bijhorende samenvatting wordt verwezen naar bijlage 11 voor stroomopwaarts en bijlage 14 voor stroomafwaarts. De voorgestelde verdelingen zijn een Erlang en Lognormale verdeling met een p-waarde van 0,219 en 0,0297 voor respectievelijk stroomopwaarts en stroomafwaarts. Dit wil zeggen dat stroomopwaarts de Erlang verdeling significant is op het 10% significantieniveau, en stroomafwaarts de Lognormale verdeling op het 1% significantieniveau. Alhoewel een significantieniveau van 1% niet overtuigend is, wordt toch geopteerd om deze verdeling te gebruiken voor de vaartijden tussen Wijnegem en Olen stroomafwaarts te benaderen.

De vier verschillende vaartijden zullen in het model worden benaderd door de kansverdeling die in bovenstaande analyse naar voren kwam.

### 3.2.9 ANALYSE DUWVAARTSLUIS

In deze praktijkstudie wordt slechts één sluiskamer gesimuleerd. Aangezien in de realiteit drie sluis kamers aan elk van de drie sluisen ingezet worden voor schepen te versassen, zullen de resultaten vertekend zijn wanneer de volledige beschikbare data worden gebruikt in het model. Immers alle schepen passeren zo via één sluis kamer, waardoor o.a. wachttijden veel hoger zullen zijn. Daarom zou een volgende stap de analyse van de aankomsten aan enkel de duwvaartsluis zijn. Echter zal deze analyse geen correct beeld geven. Dit aangezien gewone vaartuigen zowel in het Noordersas, het Middensas als de Duwvaartsluis mogen worden versast. Bij de selectie van enkel de duwvaartsluis selecteren we dan in principe alle willekeurige vaartuigen uit de aankomstenrij om deze te versassen in de Duwvaartsluis. Het is dan ook niet verwonderlijk dat een analyse van deze aankomsten laat zien dat de tussenaankomsttijden onafhankelijk zijn. Het histogram en de samenvatting werden opgesteld voor Olen stroomopwaarts en wordt weergegeven in bijlage 15. De bedieningstijden en vaartijden daarentegen kunnen wel geanalyseerd worden

zonder tot verkeerde conclusies te komen. Een analyse van de bedieningstijden werd reeds in sectie 3.2.7 uitgevoerd. De analyse van de vaartijden tussen twee sluisen is gegeven in bijlagen 16 en 17. De vaartijden kunnen nu voor beide afstanden worden benaderd door een Lognormale verdeling. Voor de afstand tussen Wijnegem en Olen is de formule " $1 + \text{LOGN}(0.997, 0.47)$ " significant op het 10% significantieniveau (p-waarde = 0,712). Voor de afstand tussen Ham en Olen is de formule " $0.64 + \text{LOGN}(0.719, 0.307)$ " significant op het 5% significantieniveau (p-waarde = 0.0699). Deze laatste is minder significant dan de eerste, maar het is voldoende significant.

### 3.3 SIMULATIEMODEL

#### 3.3.1 INLEIDING

Een simulatie is een analysemethode die systemen en modellen bevat om het gedrag van een bestaand systeem na te bootsen. Vanuit een praktisch oogpunt is simulatie het proces van het ontwikkelen van een computermodel van een bestaand of voorgesteld systeem, om er een beter inzicht over te krijgen (Kelton et al., 2010). In dit geval is het bestaande systeem de sluis van Wijnegem, Olen en Ham (Kwaadmechelen). In dit systeem speelt tijd een belangrijke rol en kunnen veranderingen enkel plaatsvinden wanneer een schip (object) de sluis binnenkomt of verlaat. Het is met andere woorden geen continu maar een discreet proces. Het doel van de simulatiestudie is het onderzoeken van de afhankelijkheid in het aankomstenritme aan een sluis.

In het model worden enkele afkortingen gebruikt. De eerste afkortingen zijn W, O en H wat staat voor respectievelijk Wijnegem, Olen en Ham. SOW en SAW zijn de afkortingen voor stroomopwaarts en stroomafwaarts waarbij soms een S wordt toegevoegd wat staat voor systeem. Zo betekent de combinatie *Schepen WSOWS* het aantal schepen dat in het systeem zit van Wijnegem stroomopwaarts. Andere afkortingen zijn analoog.

#### 3.3.2 ELEMENTEN VAN HET SIMULATIEMODEL

##### 3.3.2.1 Entiteiten

De entiteiten zijn de dynamische objecten in het systeem. In dit simulatiemodel wordt onderscheid gemaakt tussen twee soorten entiteiten: stroomafwaarts en stroomopwaarts varende schepen. De stroomopwaarts varende schepen starten aan de sluis van Wijnegem en verlaten het systeem via de sluis van Ham. Voor stroomafwaarts varende schepen geldt het omgekeerde.

##### 3.3.2.2 Attributen

Een attribuut is een karakteristiek waarvoor de waarde kan verschillen per entiteit. Door attributen kan een entiteit onderscheiden worden van de andere entiteiten. In dit model worden

aankomsttijden en afmetingen toegekend aan de schepen. De aankomsttijden worden onderverdeeld in de twee stroomrichtingen en de drie sluisen. De afmeting die aan het schip wordt toegekend, is de oppervlakte die berekend wordt aan de hand van de werkelijke lengte en breedte van de schepen. Zo worden zeven attributen bekomen:

1. Aankomsttijd WSOW: de tijd, in uren, waarop een schip aankomt aan de sluis van Wijnegem (W) in stroomopwaartse richting (SOW). Dit zijn de werkelijke aankomsten van maart 2013.
2. Aankomsttijd WSAW: aankomsttijd stroomafwaarts (SAW), analoog Aankomsttijd WSOW.
3. Aankomsttijd OSOW.
4. Aankomsttijd OSAW.
5. Aankomsttijd HSOW.
6. Aankomsttijd HSAW. Dit zijn de werkelijke aankomsten van maart 2013.
7. Opp schip: oppervlakte van het schip in vierkante meter. Deze oppervlaktes zijn de werkelijke oppervlaktes van de schepen die in maart 2013 zijn gepasseerd.

### 3.3.2.3 Variabelen

Variabelen bevatten informatie die bepaalde karakteristieken van het systeem weergeven. Een variabele kan op één ogenblik slechts één waarde aannemen. In het simulatiemodel wordt gebruik gemaakt van 37 verschillende variabelen die onderscheiden kunnen worden in acht groepen. Binnen elke groep zijn de variabelen enkel verschillend in sluisencomplex en / of stroomrichting, waardoor ze analoog zijn aan elkaar. De verschillende variabelen zijn per groep weergegeven in tabel 14.

Groep 1	Groep 2	Groep 3	Groep 4
Schepen WSOW	Resterende opp W	Sluis beschikbaar W	Deuren WSOW
Schepen OSOW	Resterende opp O	Sluis beschikbaar O	Deuren OSOW
Schepen HSOW	Resterende opp H	Sluis beschikbaar H	Deuren HSOW
Schepen HSAW			
Schepen OSAW			
Schepen WSAW			
Groep 5	Groep 6	Groep 7	Groep 8
Volgende aankomst WSOW	Tussen W en O SOW	Groepgrootte WSOW	Bedieningstijd WSOW
Volgende aankomst OSOW	Tussen O en H SOW	Groepgrootte OSOW	Bedieningstijd OSOW
Volgende aankomst HSOW	Tussen H en O SAW	Groepgrootte HSOW	Bedieningstijd HSOW
Volgende aankomst HSAW	Tussen O en W SAW	Groepgrootte HSAW	Bedieningstijd HSAW
Volgende aankomst OSAW		Groepgrootte OSAW	Bedieningstijd OSAW
Volgende aankomst WSAW		Groepgrootte WSAW	Bedieningstijd HSAW

**Tabel 14: Overzicht van variabelen**

De **eerste groep** variabelen houdt het aantal schepen bij die behoren tot het proces van versassing van een bepaald sluizencomplex en dit in een bepaalde stroomrichting. Een schip behoort tot dit proces vanaf aankomst tot uitvaren van het sluizencomplex. De **tweede groep** zijn de resterende oppervlaktes van de sluiskamers. Initieel zijn de waarden van deze variabelen 4.332 m<sup>2</sup> en hun waarde is altijd groter dan nul. Wanneer een schip de sluiskamer invaart, neemt de resterende oppervlakte af met de oppervlakte van het schip. Na elke versassing wordt de variabele terug op zijn initiële waarde gebracht. De **derde en vierde groep** variabelen zijn binaire variabelen, d.w.z. dat ze enkel twee waarden kunnen aannemen. *De eerste van deze twee groepen* behandelt de beschikbaarheid van de sluiskamer. Ze heeft de waarde nul wanneer de sluiskamer niet beschikbaar is en de waarde één wanneer ze wel beschikbaar is. Beschikbaar houdt in dat de sluiskamer niet bezig is met een versassing. De sluiskamer moet dus niet leeg zijn aangezien meerdere schepen tegelijk in een sluiskamer kunnen versast worden. *De tweede groep* van binaire variabelen bestaat uit drie variabelen die de waarde nul aannemen wanneer de deuren zijn geopend in stroomafwaartse richting en de waarde één voor stroomopwaarts. De variabelen uit de **vijfde groep** nemen de waarde van de eerstvolgende aankomsttijd van een schip aan. De **zesde groep** is analoog aan de eerste groep; het houdt het aantal schepen tussen twee sluisen bij. De variabelen van de **zevende groep** bevatten de grootte van de groep schepen die tegelijkertijd wordt versast. De initiële waarde en de waarde na elke versassing is nul. De waarde neemt toe met één bij elk invarend schip. De **achtste groep** bestaat uit variabelen die de bedieningstijden van elke versassing als waarde bevatten. Deze waarden zijn ingelezen, zodat het de werkelijke bedieningstijden van maart 2013 zijn.

---

#### 3.3.2.4 Bronnen

Het simulatiemodel is opgebouwd rond drie bronnen, namelijk de duwvaartsluis van Wijnegem, Olen en Ham met elk een beschikbare oppervlakte (capaciteit) van 4.332 m<sup>2</sup>. Schepen kunnen deze oppervlakte innemen wanneer ze de sluiskamer binnenvaren.

---

#### 3.3.3 ASSUMPTIES

Het model bestaat uit **drie sluizencomplexen**, namelijk Wijnegem, Olen en Ham. Het is belangrijk dat een goed beeld wordt verkregen van de afhankelijkheid tussen de drie sluisen. Om deze reden wordt slechts **één sluiskamer** voor elk sluizencomplex verwerkt in het model. Het gaat om de duwvaartsluis, de grootste sluis met een afmeting van 24m x 200m. De drie sluisen vormen een **gesloten systeem**. Dit houdt in dat wordt verondersteld dat de schepen nergens laden of lossen en ze het systeem enkel verlaten via de twee buitenste sluisen (Wijnegem stroomafwaarts en Ham stroomopwaarts). Bovendien wordt verondersteld dat de schepen slechts in één bepaalde richting doorheen het systeem varen.

De sluiscapaciteit wordt bepaald aan de hand van de **beschikbare oppervlakte**. Concreet houdt dit in dat de sluiskamer een bepaalde oppervlakte heeft die schepen kunnen innemen totdat de

resterende oppervlakte te klein is voor een volgend vaartuig. Deze beschikbare oppervlakte is de oppervlakte van de duwvaartsluis. Echter is het niet realistisch dat 100% van de sluisoppervlakte beschikbaar is. Er moet bijvoorbeeld altijd ruimte overblijven tussen twee schepen, zodat oppervlakte verloren gaat. Daarom wordt een marge van 5% aangenomen op de lengte en de breedte van de sluis:  $22,8\text{m} \times 190\text{m} = 4.332 \text{ m}^2$ . De beschikbare oppervlakte van elke sluiskamer is dan  $4.332 \text{ m}^2$ .

De **oppervlaktes van de schepen** worden ingelezen. Dit wil zeggen dat de schipoppervlaktes berekend op basis van de werkelijke schipafmetingen van maart 2013 worden gebruikt in het model. Hierbij wordt verondersteld dat de oppervlakte die het schip inneemt rechthoekig is, namelijk het product van de lengte en de breedte.

Volgens de regels heeft een schip recht op versassing wanneer het de 500m paal voorbij is gevaren. Daarom wordt de assumptie gemaakt dat de aankomsttijden aan de 500m paal zijn. Vanaf het moment dat een schip deze stoppaal passeert, behoort het tot het systeem van dat sluisencomplex. Voor de volgorde van versassing wordt gebaseerd op de prioriteitsregels van NV De Scheepvaart, beschreven in sectie 2.1.4. Dit houdt in dat het **FIFO principe** wordt gehanteerd. Tevens wordt voorrang gegeven aan een **uitwisselingsversassing**. Dit houdt in dat wanneer aan beide zijden van de sluis een schip in de wachtrij staat, het schip dat aan de zijde waar de sluisdeuren open staan eerst mag versast worden.

Wanneer een **schip binnen 30 minuten afstand** is van de sluis, wacht de sluismeester op dit schip vooraleer te starten met de versassing. Theoretisch gezien heeft dit schip nog geen recht op versassing aangezien het de 500m paal nog niet gepasseerd is, maar in de praktijk komt dit wel voor.

**De sluisbedieningstijden** worden ingelezen, d.w.z. dat de werkelijke bedieningstijden van maart 2013 worden gebruikt. De reden is dat in de data-analyse geen statistische verdeling een significante benadering vertoonde. Voor het omdraaien van een lege sluis werd een meting gedaan aan de duwvaartsluis van Genk. Het sluiten en openen van de deuren duurt in totaal vier en een halve minuut. Het waterniveau op peil brengen duurt 12 minuten. Aangezien de infrastructuur van de zes sluizen op het Albertkanaal nagenoeg identiek is, is het realistisch dat de totale tijd voor een lege Duwvaartsluis om te keren 16,5 minuten bedraagt.

**De vaartijden** worden geschat aan de hand van een statistische kansverdeling. Voor de tijden tussen de sluis van Wijnegem en Olen is dit de Lognormale verdeling " $1 + \text{LOGN}(0.997, 0.47)$ ". De tijden tussen Olen en Ham worden geschat aan de hand van de Lognormale verdeling " $0.64 + \text{LOGN}(0.719, 0.307)$ ". Beide verdelingen bleken uit de data-analyse een significante benadering te zijn voor de vaartijden.

In het model wordt met enkele zaken **geen rekening gehouden**. Ten eerste wordt geen rekening gehouden met de lading van schepen waaraan voorrangregels zijn verbonden. Dit zou de



complexiteit van het simulatiemodel verhogen. Ten tweede zijn dienstonderbrekingen niet opgenomen omwille van de reden dat hier geen gegevens over beschikbaar zijn.

Een overzicht van de assumpties is gegeven in tabel 15.

---

**Gesloten systeem bestaande uit drie sluizencomplexen met elk één sluiskamer. Schepen varen enkel in één richting doorheen het systeem.**

**Beschikbare oppervlakte van Duwvaartsluis bedraagt 4.332 m<sup>2</sup>. Plaatsing van schepen gebeurt op basis van de resterende beschikbare oppervlakte.**

**Schipoppervlaktes worden ingelezen. Deze zijn berekend volgens de oppervlakteformule voor een rechthoek en dit op basis van de werkelijke schipafmetingen.**

**Prioriteitsregel: FIFO ; voorrang op uitwisselingsversassing.**

**Wachten met versassen wanneer volgend schip binnen 36 minuten arriveert.**

**Sluisbedieningstijden zijn de werkelijke tijden van maart 2013. Omkeren van een lege sluis duurt 16,5 minuten.**

**Vaartijden tussen Wijnegem, Olen en Ham volgen een Lognormale verdeling.**

**Geen rekening met voorrangregels van ladingen en dienstonderbrekingen.**

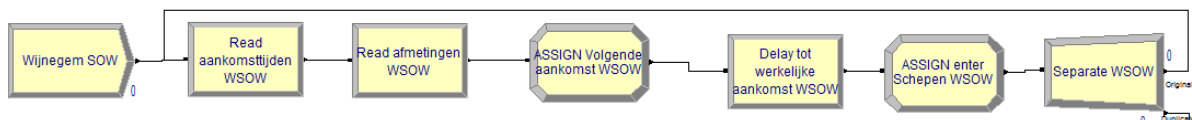
**Tabel 15: Overzicht assumpties simulatiemodel**

---

#### 3.3.4 BESCHRIJVING SIMULATIEMODEL

Het simulatiemodel wordt per sluis opgedeeld in drie delen. Het eerste deel behandelt de aankomsten van schepen aan een specifieke sluis, het tweede deel het aanschuiven voor een versassing en het derde deel het effectieve versassingsproces. Aangezien enkel in de eerste van de drie sluizen de werkelijke aankomsttijden worden ingelezen, d.w.z. Wijnegem in stroomopwaartse richting en Ham in stroomafwaartse richting, (verschilt het aankomsten gedeelte voor de eerste sluis van de tweede en derde sluis. Aan de twee laatste sluizen zijn de aankomsten telkens rechtstreeks vanuit de voorgaande sluis. Het stroomafwaartse gedeelte is volledig analoog aan het stroomopwaartse. Omdat Wijnegem de eerstvolgende sluis is vanaf de Haven van Antwerpen, gaat de voorkeur uit naar het beschrijven van het stroomopwaartse gedeelte, d.w.z. van Wijnegem naar Ham.

Het eerste gedeelte is het aankomstengedeelte, weergegeven in figuur 16. In de *Create* module **Wijnegem SOW** wordt de entiteit *Schepen SOW* eenmalig aangemaakt. In de *ReadWrite* module, **Read aankomsttijden WSOW**, wordt vervolgens de werkelijke aankomsttijd ingelezen uit een tekstbestand. In figuur 14 is te zien dat deze module twee verbindingen heeft als input. Enerzijds de *Create* module en anderzijds de *Separate* module **Separate WSOW**. Deze tweede verbinding zorgt ervoor dat de constructie te vergelijken is met een lus. Na het aankomstengedeelte te doorlopen, gaat de entiteit terug naar **Read aankomsttijden WSOW** om zo de volgende aankomsttijd in te lezen. Dit totdat alle aankomsttijden zijn gelezen. Dit verklaart tegelijk ook waarom de entiteit slechts eenmalig wordt aangemaakt in **Wijnegem SOW**. Aansluitend aan de aankomsttijd wordt de schipoppervlakte ingelezen via de *ReadWrite* module **Read afmetingen WSOW**. Zowel de waarde van de aankomsttijd als de schipoppervlakte worden toegewezen aan de entiteit in de vorm van de attributen *Aankomsttijd WSOW* en *Opp schip*. Om verder in het model te kunnen werken met uitdrukkingen, worden de waarden van deze twee attributen toegewezen aan variabelen. Dit gebeurt in de *Assign* module **ASSIGN Volgende aankomst WSOW**. De eerste variabele *Volgende aankomst WSOW* neemt de waarde van de aankomsttijd aan. Aangezien de aankomsttijden worden ingelezen, moet de entiteit ook wachten tot op het ogenblik waarop de ingelezen waarde overeenkomt met de simulatieklok. Dit gebeurt door in de *Delay* module **Delay tot werkelijke aankomst WSOW** de entiteit te laten wachten aan "Volgende aankomst WSOW – TNOW" uur. Na deze wachttijd wordt verondersteld dat het schip de 500m paal passeert en dus tot het sluizensysteem van Wijnegem behoort. Daarom wordt de variabele *Schepen WSOWS* vermeerderd met één in de module **ASSIGN enter Schepen WSOW**. Het aankomstengedeelte wordt afgesloten door de entiteit te verdubbelen. De originele entiteit gaat terug naar **Read aankomsten WSOW** en het duplicaat gaat verder het model in.



**Figuur 14: Aankomstengedeelte Wijnegem**

Het tweede gedeelte bestaat uit het aanschuiven en het toewijzen van schepen aan de sluiskamer. Figuur 15 illustreert het simulatiemodel van dit gedeelte. De geduplicateerde entiteit komt aan in de *Hold* module **Hold WSOW**. Deze module stelt in principe de wachtrij aan de sluis voor. Schepen worden hier tegengehouden totdat voldaan is aan de volgende voorwaarde:

$Sluis\ W\ beschikbaar == 1 \ \&\& \ (Deuren\ WSOW == 1 \ || \ Schepen\ WSAWS == 0) \ \&\& \ ((Resterende\ opp\ W - Opp\ Schip) \geq 0)$

Concreet bestaat de voorwaarde uit verschillende subvoorwaarden die simultaan (&&-teken) moeten voldaan zijn:

- *Sluis W beschikbaar == 1*: de sluiskamer van Wijnegem is niet bezig met een versassing.
- (*Deuren WSOW == 1* || *Schepen WSAWS == 0*): de sluisdeuren zijn in stroomopwaartse richting geopend OF (||-teken) er zijn geen schepen in het sluisencomplex van Wijnegem die stroomafwaarts varen. Het schip moet kunnen doorvaren ofwel moet de sluis worden omgekeerd. Het omkeren van de sluis kan op twee manieren: ofwel wordt de sluis leeg omgedraaid, ofwel wordt gewacht op een versassing in tegengestelde richting zodat de deuren automatisch in de juiste richting zijn geopend. Een lege versassing gebeurt daarom enkel wanneer geen schepen in stroomafwaartse richting aankomen.
- (*Resterende opp W - Opp Schip*) >= 0 : een schip kan enkel doorvaren wanneer het nog in de sluiskamer past, d.w.z. de resterende oppervlakte is groter dan de schipoppervlakte.

Aangezien de schepen die stroomafwaarts varen gebruik maken van dezelfde sluiskamer, moeten de voorwaarden voor stroomopwaarts en stroomafwaarts op elkaar afgestemd zijn. Daarom is de voorwaarde voor stroomafwaarts:

*Sluis W beschikbaar == 1 && (Deuren WSOW==0 || Schepen WSOWS==0) && ((Resterende opp W - Opp Schip) >=0 )*

Elk van deze twee voorwaarden zijn zo dat enkel in één richting tegelijk een doorstroom mogelijk is. Stel dat aan beide zijden schepen staan te wachten en de sluiskamer is leeg en beschikbaar. Wanneer de deuren in stroomopwaartse richting geopend zijn (*Deuren WSOW == 1*), zullen de stroomopwaartse schepen verder kunnen varen totdat de resterende oppervlakte te klein is voor een bijkomend schip. Voor de stroomafwaarts varende schepen geldt immers dat ofwel de deuren moeten geopend zijn in hun richting (*Deuren WSOW == 0*), ofwel wanneer dit niet is, dat er geen stroomopwaarts varende schepen zijn (*Schepen WSOWS == 0*).

Wanneer voldaan is aan de voorwaarde, gaat de entiteit verder naar de *Decide* module **Deuren WSOW geopend?** waar wordt nagegaan of de binaire variabele *Deuren WSOW* de waarde één heeft. Indien dit niet zo is moet de sluis eerst worden omgedraaid. De entiteit gaat verder naar **Omdraaien WSOW** waar de variabele *Sluis W beschikbaar* de waarde nul krijgt. De sluiskamer is immers niet meer beschikbaar. Vervolgens wordt een wachttijd van 16,5 minuten ondergaan in **Sluis W omdraaien**. Aansluitend wordt in **Omdraaien WSOW finished** zowel de variabele *Sluis W beschikbaar* als *Deuren WSOW* op één gezet. De sluiskamer is nu beschikbaar en de deuren zijn in de juiste richting geopend, zodat de entiteiten verder kunnen naar de **ASSIGN resterende opp en groepsgrootte W**. Hierin wordt de variabele *Groepsgrootte W* vermeerderd met één telkens wanneer een entiteit passeert. Tegelijk wordt *Resterende opp W* verminderd met de schipoppervlakte van het passerende schip. Dit omdat in de *Seize* module **Toewijzen Sluis Wijnegem** de entiteit de sluisoppervlakte zal innemen. Vanzelfsprekend zal het schip nu de sluis binnenvaren. Dit gebeurt in de module **Binnenvaren Sluis Wijnegem**. Hier ondergaat een schip een wachttijd van twee minuten om de sluiskamer binnen te varen. Zoals reeds aangehaald zal gewacht worden met een versassing indien een volgend schip binnen de 15 minuten zal arriveren.

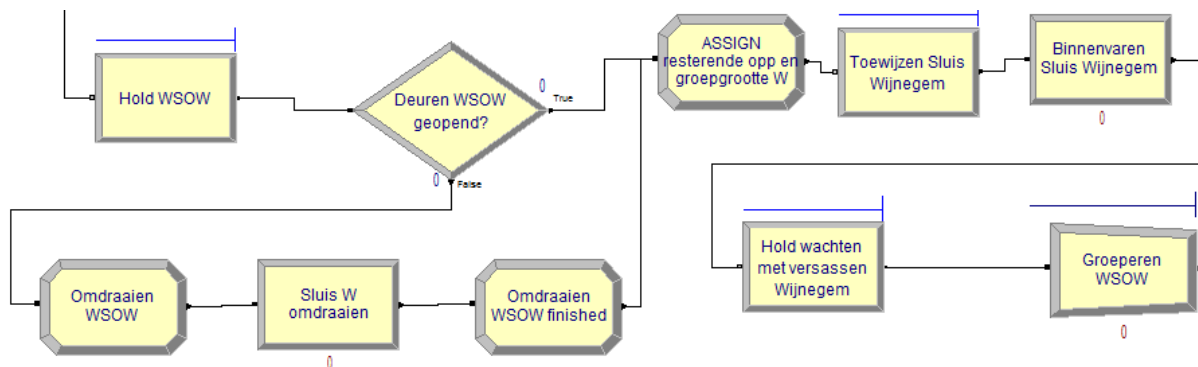
In de *Hold* module **Hold wachten met versassen Wijnegem** worden daarom entiteiten pas doorgelaten wanneer voldaan is aan volgende uitdrukking:

$(\text{Volgende aankomst WSOW-TNOW} \geq 0.6) \ || \ (\text{Resterende opp W} < 62) \ || \ (\text{NQ}(\text{Hold WSOW.Queue}) \geq 1)$

De voorwaarde bestaat uit drie subvoorwaarden waarvan aan enkel één moet voldaan zijn.

- $(\text{Volgende aankomst WSOW-TNOW} \geq 0.6)$ : de volgende aankomst is groter dan of gelijk aan 0,6 uur (36 minuten).
- $(\text{Resterende opp W} < 62)$ : de resterende oppervlakte van de sluis is kleiner dan de oppervlakte van het kleinste schip in de database, namelijk 62 m<sup>2</sup>.
- $(\text{NQ}(\text{Hold WSOW.Queue}) \geq 1)$ : in de wachtrij is reeds een schip aan het wachten, omdat het niet voldeed aan de voorwaarde in **Hold WSOW**.

Wanneer aan één van de voorwaarden is voldaan, betekent dit dat de versassing mag beginnen. De schepen worden gegroepeerd in de *Batch* module **Groeperen WSOW**, met een groeps grootte die gelijk is aan de waarde van de variabele *Groeps grootte WSOW*. Vervolgens gaan de gegroepeerde entiteiten samen door naar het versassingsproces.



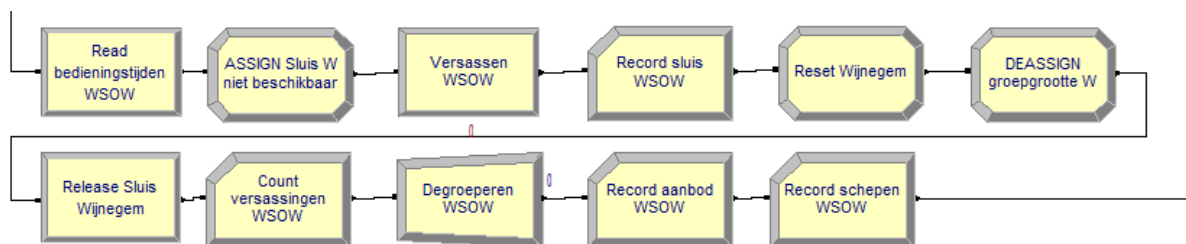
**Figuur 15: Aanschuiven en toewijzen aan sluiskamer**

Het derde deel is het effectieve versassingsproces, weergegeven in figuur 16. Aangezien in de analyse van de data geen verdeling in staat was de bedieningstijden significant te benaderen, worden de werkelijke bedieningstijden ingelezen via de *ReadWrite* **Read bedieningstijden WSOW**. De waarde wordt toegekend aan de variabele *Bedieningstijd WSOW*. Omdat de versassing zal beginnen, is de sluiskamer niet langer beschikbaar voor schepen. Daarom wordt in **ASSIGN Sluis W niet beschikbaar** de variabele *Sluis W beschikbaar* gelijkgesteld aan nul. Vervolgens wordt de versassing gesimuleerd door de entiteitengroep te laten wachten aan een tijd die gelijk is aan de waarde van *Bedieningstijd WSOW*. Dit gebeurt in de **Versassen WSOW**. Om de gebruikte sluis capaciteit na de simulatie te kunnen analyseren wordt de uitdrukking "4.332 – Resterende opp

W" na elke versassing opgeslagen in **Record sluis WSOW**. Wanneer de versassing afgelopen is, moeten enkele variabelen van waarden veranderen. In **Reset Wijnegem** gebeurt het volgende:

- I. *Schepen WSOW* wordt verminderd met één, omdat het schip uit het systeem van Wijnegem vaart.
- II. *Tussen W en O SOW* wordt vermeerderd met één, omdat het schip zich nu bevindt tussen de sluis van Wijnegem en Olen.
- III. *Sluis W beschikbaar* wordt terug op de waarde één gezet, zodat de sluiskamer terug beschikbaar is voor andere schepen.
- IV. *Resterende Opp W* wordt teruggezet op 4.332, zodat de sluiskamer opnieuw volledig leeg is.
- V. *Deuren WSOW* wordt op de waarde nul gezet, omdat de deuren van de sluis bij het verlaten van de sluis open blijven staan in stroomafwaartse richting.

In de module **DEASSIGN** groeps grootte W wordt ook de waarde van *Groeps grootte WSOW* teruggebracht naar nul. Omdat de schepen de sluisoppervlakte niet langer innemen, wordt ook de waarde van de bron *Sluis Wijnegem* terug naar initiële waarde gebracht in **Release Sluis Wijnegem**. Vervolgens wordt het aantal versassingingen geteld via de *Record* module **Count versassingingen WSOW**. Dit door het aantal passerende groepen te tellen. Na de versassing moeten de schepen degroeperen. Dit gebeurt in de *Separate* module **Degroeperen WSOW**. Tenslotte willen we de totale tijd die nodig is om het schip te versassen bijhouden. In de literatuurstudie werd dit ook het aanbod van een sluis genoemd, zodat in de *Record* module **Record aanbod WSOW** de expressie "TNOW-Aankomsttijd WSOW" wordt opgeslagen. Dit is de tijd waarop het schip de sluis buitenvaart verminderd met het tijdstip waarop het aan de sluis is aangekomen. Tenslotte wordt ook het aantal passerende schepen bijgehouden in **Record schepen WSOW**.



**Figuur 16: Versassingsproces**

### 3.3.4.2 Olen

De aankomsten van Olen zijn aansluitend aan de vertrekken van Wijnegem. Het proces is weergegeven in figuur 17. De module **Naar sluis Olen SOW** simuleert de vaartijd die de schepen nodig hebben om van de sluis van Wijnegem naar Olen te varen. De vaartijd volgt een Lognormale verdeling, de totale vaartijd in het model is bijgevolg gelijk aan de uitdrukking  $(1 + \text{ERLA}(0.184, 5)) - 0.6$ . Het is belangrijk op te merken dat de totale vaartijd gelijk is aan de tijd die geschat

wordt door de verdeling verminderd met een half uur (0,6 uur). Dit omdat verder in het model zal gewacht moeten worden met een versassing wanneer een schip binnen het half uur zal arriveren. In de volgende *Assign* module **ASSIGN Volgende aankomst OSOW** neemt de variabele *Volgende aankomst WSOW* de waarde "TNOW + 0,6", oftewel de huidige tijd (die de simulatieklok aangeeft) vermeerderd met 36 minuten. Net zoals in het aankomstengedeelte van Wijnegem ondergaat de entiteit nu een vertraging in **Delay tot werkelijke aankomst OSOW**. Het verschil is dat de grootte van de vertraging nu telkens exact 36 minuten bedraagt. Dit is het half uur dat bij de vaartijd werd gereduceerd. Na deze *Delay* module te hebben doorlopen, behoort de entiteit tot het sluisencomplex van Olen. Daarom wordt nu in **ASSIGN Schepen en Aankomsttijd OSOW** de variabelen *Tussen W en O SOW* verminderd en *Schepen OSOWS* vermeerderd met één, en *Aankomsttijd OSOW* krijgt de huidige waarde van de simulatieklok, "TNOW", toegewezen. Omdat het belangrijk is na te gaan of de aankomsten aan de sluis afhankelijk zijn, worden de aankomsttijden opgeslagen in de *Record* module **Record aankomsttijd OSOW**. Hierbij wordt een *Statistic* module gebruikt om de tussenaankomsttijden in een lijst te verkrijgen. Vervolgens kan de lijst worden ingelezen in de Input Analyzer, zodat kan nagegaan worden of een kansverdeling de tussenaankomsten kan benaderen.

Aangezien het aankomstengedeelte verschillend is, is in de tweede *Hold* module, namelijk **Hold wachten met versassen Olen**, de uitdrukking verschillend. Om na te gaan of een schip binnen de 36 minuten zal arriveren, wordt een gedeelte van de uitdrukking vervangen. Dit is het vetgedrukte gedeelte in de volgende uitdrukking:

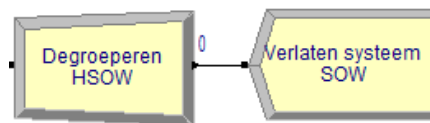
**(Volgende aankomst OSOW-TNOW<0)** || (Resterende opp 0 < 62 ) || (NQ(Hold OSOW.Queue) >= 1)

In de voorgaande module **Assign Volgende aankomst OSOW** krijgt de variabele *Volgende aankomst OSOW* telkens een nieuwe waarde toegekend. Met betrekking tot de aankomsttijd is het van belang dat een versassing van start gaat wanneer nog voldoende resterende oppervlakte beschikbaar is en een volgend schip pas zal arriveren over meer dan een half uur. Daarom zullen schepen worden versast wanneer het verschil van de volgende aankomst en de huidige simulatieklok kleiner is dan nul. De rest van het model van Olen is volledig analoog aan dit van Wijnegem.



**Figuur 17: Aankomsten Olen stroomopwaarts**

Het volledige simulatiemodel van Ham is analoog aan dit van Olen. De twee belangrijke verschillen zijn de vaartijden en het einde van de versassing. De vaartijd tussen Olen en Ham is analoog, maar volgt een verschillende formule, namelijk de Lognormale verdeling:  $(0.6 + \text{ERLA}(0.0991, 12)) - 0.6$ . Het tweede verschil ligt in het verlaten van de sluiskamer. De schepen verlaten nu het systeem via een *Dispose* module, in plaats van terecht te komen tussen twee sluisen. Dit is weergegeven in figuur 18. Na het degroeperen verlaten de schepen het systeem van de drie sluisen in stroomopwaartse richting via **Verlaten systeem SOW**.



**Figuur 18: Verlaten van systeem via Ham**

### 3.3.5 REPLICATIEPARAMETERS

Aangezien sluisen op zondag gesloten zijn tot 22 uur, betreft het een eindigende simulatie. In de data-analyse werd reeds beslist om de aankomsten van zondag te verwijderen, omdat de trafiek te afwijkend was. Zaterdagen daarentegen weken niet sterk af van de weekdays, zodat op basis van de histogrammen werd geopteerd om deze niet te verwijderen. De simulatie start op 1 maart 2013, met een opwarmperiode van 24 uur. Dit betekent dat in totaal 26 replicaties van elk 24 uur zullen worden uitgevoerd met telkens de data van een volgende dag uit maart 2013. De eerste replicatie is een opwarmperiode zodat de berekening van de resultaten berust op 25 replicaties. De keuze voor een opwarmperiode ligt aan het feit dat een sluis 24 uur open is en de aankomsten enkel aan de eerste sluis worden ingelezen in het model. De tweede en derde sluis hebben bijgevolg in het model de eerste uren geen aankomsten. Daarom is een opwarmperiode nodig. Aangezien elke replicatie eindigt na 24 uur, spreken we nog steeds over een eindigende simulatie. Dit omdat het tijdsframe van de simulatie duidelijk gedefinieerd is.

Inzake de replicatielengte werden twee opties afgewogen, namelijk een lengte van één dag (24 uur), ofwel de lengte van één volledige maand. Het geeft een beter overzicht om de resultaten van één dag te bekijken. Toch is de lengte van één maand mogelijk correcter. Daarom worden de verschillen in de belangrijkste resultaten naast elkaar gezet in tabel 16. Het is duidelijk dat tussen de twee replicatielengtes wel degelijk verschillen zijn. Toch lijken deze verschillen eerder klein te zijn, zodat de replicatielengte van één dag niet tot verschillende conclusies zullen leiden.

	Dag	Maand	Vershil in uren	Vershil in minuten
<b>Wachttijd WSOW</b>	0,671	0,7022	-0,0312	-1,872
<b>Wachttijd OSOW</b>	0,7591	0,7724	-0,0133	-0,798
<b>Wachttijd HSOW</b>	0,7499	0,7348	0,0151	0,906
<b>Wachttijd HSAW</b>	0,6491	0,7032	-0,0541	-3,246
<b>Wachttijd OSAW</b>	0,6731	0,7106	-0,0375	-2,25
<b>Wachttijd WSAW</b>	0,6844	0,7228	-0,0384	-2,304
<b>Aanbod WSOW</b>	0,9987	1,0305	-0,0318	-1,908
<b>Aanbod OSOW</b>	1,1087	1,1357	-0,027	-1,62
<b>Aanbod HSOW</b>	1,0253	1,0263	-0,001	-0,06
<b>Aanbod HSAW</b>	0,9321	0,986	-0,0539	-3,234
<b>Aanbod OSAW</b>	1,0174	1,0477	-0,0303	-1,818
<b>Aanbod WSAW</b>	1,0332	1,0707	-0,0375	-2,25

**Tabel 16: Vergelijking replicatielengte (tijden in uren)**

### 3.3.6 PRESTATIEMAATSTAVEN

De beoordeling van het sluizensysteem gebeurt aan de hand van een of meerdere prestatie maatstaven. Dit wil zeggen dat we een aantal maatstaven die belangrijk zijn voor deze praktijkstudie gaan onderzoeken. Uit de literatuurstudie komt naar voor dat de wachttijd een belangrijk aspect is. Daarom zal voor de sluiswerking de maximale en gemiddelde wachttijd worden onderzocht. De belangrijkste maatstaf voor de onafhankelijkheid in dit onderzoek is echter de mate waarin de aankomsten aan sluisen kunnen worden benaderd door een statistische kansverdeling. Concreet zal hiervoor de p-waarde voor de fit van de beste verdeling, dit is de verdeling die wordt voorgesteld door de Input Analyzer, gebruikt worden. In de literatuurstudie werd een numerieke methode aangehaald om afhankelijkheid te identificeren. Echter omdat deze methode veel werk vergt wordt deze slechts eenmalig toegepast.

## 3.4 VALIDATIE

Aangezien het belangrijk is dat het simulatiemodel het werkelijke systeem goed benadert, wordt nu de validatie besproken. Allereerst moet opgemerkt worden dat het simulatiemodel afwijkt van het werkelijke systeem omdat het uitgaat van een gesloten systeem. Dit houdt in dat schepen de drie sluisen passeren zonder een tussenstop te maken of het systeem te verlaten. In de realiteit is dit echter niet zo, schepen verlaten de sluis of varen na een tussenstop terug in de andere richting. Dit



vormt enerzijds de mogelijkheid dat de werking van het model afwijkt van de realiteit, en anderzijds bemoeilijkt dit de vergelijking van de gegevens. Dit omwille van het probleem dat de werkelijke aankomsten aan de tweede sluis en derde sluis enkel te berekenen zijn wanneer het gaat om hetzelfde schip op een realistisch moment. Concreet betekent dit dat enkel de werkelijke aankomsten kunnen gebruikt worden voor de schepen die aan zowel de eerste als tweede sluis zijn gepasseerd en dit binnen een kortere tijdsperiode, zodat ze geen tussenstop hebben gemaakt. Omwille van deze reden wordt voor de validatie van het model enkel de tussenaankomsten aan de tweede sluis vergeleken. De aankomsten aan de eerste sluis zijn immers de werkelijke aankomsten, zodat deze niet relevant zijn om te vergelijken.

De validatie gebeurt door de werkelijke aankomsten van Wijnegem stroomopwaarts en Ham stroomafwaarts in te lezen van enkel die schepen die aan beide sluisen zijn gepasseerd en dit binnen een aanvaardbare tijdsperiode. Het is bijvoorbeeld niet logisch dat een schip na aankomst aan de eerste sluis pas 124 uur later aan de tweede sluis aankomt. Om rekening te houden met lange wachtrijen en vaartijden werd geopteerd voor een afkapwaarde van tien uur. Vervolgens worden de tussenaankomsten van deze schepen vergeleken met de tussenaankomsten in het model. Dit enkel voor de tweede sluis in elke stroomrichting, d.w.z. Olen in beide vaarrichtingen. De derde sluis wordt niet gevalideerd, omdat de schepen geselecteerd moeten worden die aan de drie sluisen zijn gepasseerd. Dit is niet voor de hand liggend en vergt te veel tijd. Aan de hand van Excel werd een t-test uitgevoerd in de assumptie dat de varianties van de twee steekproeven verschillend zijn. We veronderstellen dat aan de voorwaarden van een t-test voldaan is (beide steekproeven komen uit een normale verdeling en zijn onafhankelijk van elkaar). De samenvatting wordt gegeven in tabel 17 voor Olen stroomopwaarts, en tabel 18 voor Olen stroomafwaarts. Voor stroomopwaarts zien we dat de waarde van de t-test (0,9887) groter is dan het negatieve kritieke gebied (-1,9646) en kleiner dan het positieve kritieke gebied (1,9646). Voor stroomafwaarts is dit analoog. Dit betekent dat voor beide vaarrichtingen de nulhypothese van de gemiddelde tussenaankomsten aan elkaar gelijk zijn en niet worden verworpen op het 5% significantieniveau. De werkelijke tussenaankomsttijden en die van het simulatiemodel zijn bijgevolg niet significant verschillend van elkaar. We mogen dus zeggen dat het simulatiemodel het werkelijke systeem goed benadert.

<i>T-test Olen stroomopwaarts</i>	<i>Werkelijk</i>	<i>Simulatie</i>
Gemiddelde	1,885837579	2,157355457
Variantie	6,312880194	17,61403334
Waarnemingen	318	317
Schatting van verschil tussen gemiddelden	0	
Alpha	5%	
Vrijheidsgraden	516	
T- statistische gegevens	0,988700974	
P(T<=t) tweezijdig	0,323272851	
Kritiek gebied van T-toets: tweezijdig	1,964571944	

**Tabel 17: t-test Olen stroomopwaartse (observaties in uren)**

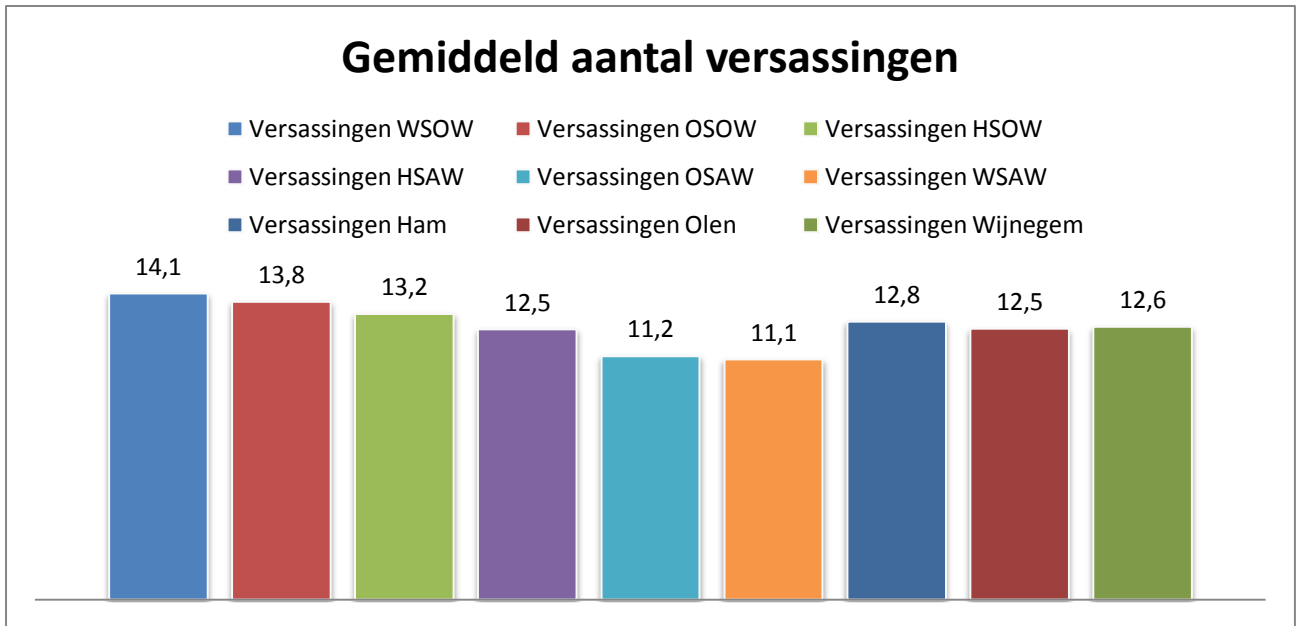
<i>T-test Olen stroomafwaarts</i>	<i>Werkelijk</i>	<i>Model</i>
Gemiddelde	2,675881601	2,809620634
Variantie	27,15335787	15,52668979
Waarnemingen	218	216
Schatting van verschil tussen gemiddelden	0	
Vrijheidsgraden	404	
Alpha	5%	
T- statistische gegevens	-0,301747554	
P(T<=t) tweezijdig	0,762999778	
Kritiek gebied van T-toets: tweezijdig	1,965853199	

**Tabel 18: t-test Olen stroomafwaarts (observaties in uren)**

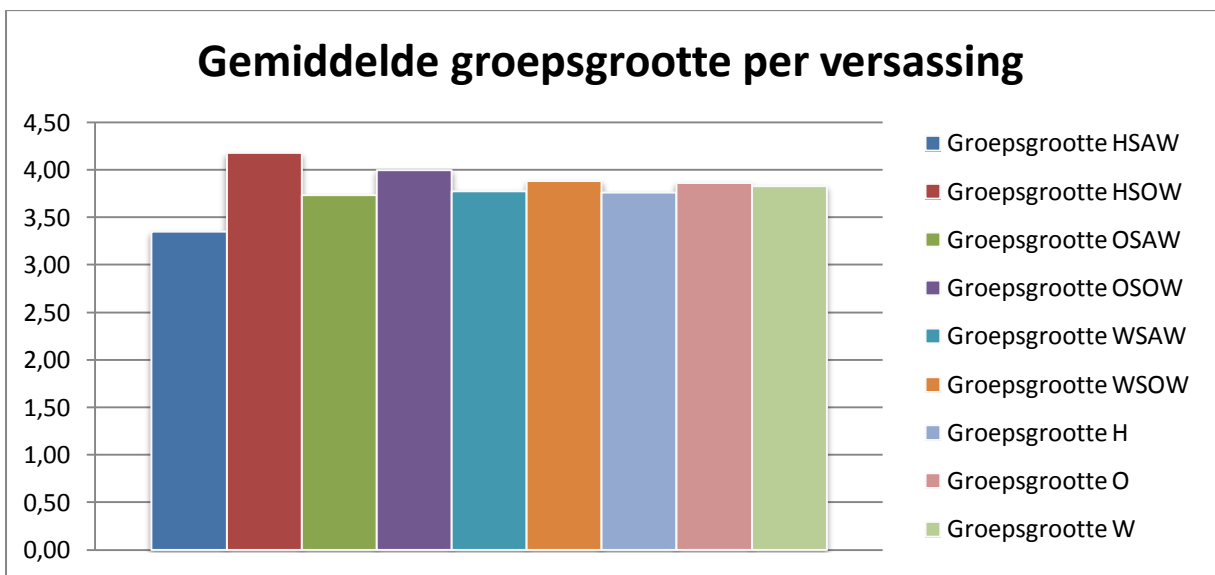
### 3.5 BESPREKING SIMULATIERESULTATEN

#### 3.5.1 ALGEMEEN

Aangezien het een gesloten systeem betreft, is het logisch dat aan elk van de drie sluisen gemiddeld hetzelfde aantal schepen per stroomrichting passeren. Per replicatie passeren gemiddeld 42 schepen stroomafwaarts en 55 schepen stroomopwaarts doorheen het systeem. Dit betekent dat gemiddeld 30,95% meer schepen in stroomopwaartse richting varen. In totaal verlaten per replicatie gemiddeld 97 schepen het systeem. Het gemiddelde aantal versassingen is meestal verschillend per sluis. Omdat meer schepen stroomopwaarts varen, is het vanzelfsprekend dat hier meer versassingen plaatsvinden. Het gemiddeld aantal versassingen per replicatie is in figuur 19 in een stavendiagram weergegeven per sluis en stroomrichting. De eerste sluis (in elke stroomrichting) blijkt het hoogste gemiddelde aantal versassingen te hebben (de donkerblauwe en paarse staven). Bovendien blijkt het aantal versassingen aan elke sluis te dalen. Dit illustreert het concept van afhankelijkheid die ontstaat door het verminderen van de spreiding tussen aankomsten. Aan elke volgende sluis gaat steeds meer spreiding tussen schepen worden verwijderd, omdat gewacht wordt op een volgend schip om ze vervolgens in groep te versassen. Bijgevolg stijgt telkens de groepsgrootte waardoor het gemiddeld aantal versassingen lager is ten opzichte van voorgaande sluisen. Het aantal schepen per versassing is uiteraard gerelateerd aan het aantal versassingen. Hiermee wordt geïmpliceerd dat daar waar het aantal versassingen laag is, de groepsgrootte per versassing gemiddeld hoger zal liggen en omgekeerd waar het aantal versassingen hoger is. In figuur 20 is deze relatie duidelijk te herkennen. Wijnegem stroomopwaarts springt uit met het hoogst gemiddeld aantal versassingen en de kleinste gemiddelde groepsgrootte.



**Figuur 19: Gemiddeld aantal versassingen per sluis en vaarrichting, per replicatie**



**Figuur 20: Gemiddelde groeps-grootte per versassing, per sluis en stroomrichting, per replicatie**

### 3.5.2 AFHANKELIJKHEID

Om na te gaan of een afhankelijkheid aanwezig is in de aankomsttijden aan de tweede en derde sluis in de twee stroomrichtingen, worden de tussenaankomsttijden ingelezen in de Input Analyzer. De tussenaankomsttijden worden bekomen door de gegevens, die verzameld werden via de *Statistic* modules, te analyseren met de Output Analyzer. Via de optie *Graph > Table* wordt een tabel bekomen. Deze tabel kan vervolgens gekopieerd worden in Excel, zodat de juiste gegevens kunnen worden geselecteerd en vervolgens opgeslagen in een tekstbestand. De analyse van Olen

en Ham stroomopwaarts en Olen en Wijnegem stroomafwaarts zijn terug te vinden in bijlagen 18 tot en met 21. Een samenvatting voor de vier analyses wordt gegeven in tabel 19. De conclusie is dat aan alle vier de sluizen de aankomsten afhankelijk zijn. Dit was uiteraard te verwachten aangezien de literatuur vermeldt dat de aankomsten aan serieel opeenvolgende sluizen afhankelijk zijn.

<b>Werkelijke aankomsten</b>	<b>Wijnegem SOW</b>	<b>Olen SOW</b>	<b>Ham SOW</b>	<b>Ham SAW</b>	<b>Olen SAW</b>	<b>Wijnegem SAW</b>
<b>Verdeling</b>	/	Lognormaal	Lognormaal	/	Lognormaal	Lognormaal
<b>Test statistiek</b>	/	36,1	38,8	/	65,6	28,8
<b>p-waarde</b>	/	< 0.005	< 0.005	/	< 0.005	< 0.005
<b>Conclusie</b>	Afhankelijk	Afhankelijk	Afhankelijk	Afhankelijk	Afhankelijk	Afhankelijk

**Tabel 19: Samenvatting voor aankomsten aan de vier sluizen**

In de literatuurstudie werd een formule besproken om afhankelijk na te gaan in numerieke waarden. Hiervoor wordt het model opgesplitst in drie geïsoleerde sluizen. Met een geïsoleerde sluis wordt bedoeld dat de sluis als een onafhankelijk en gesloten systeem fungeert. Wanneer  $S$ , de totale wachttijd van het systeem, kleiner is dan  $I$ , de som van de totale wachttijden aan de drie geïsoleerde sluizen, zijn de sluizen afhankelijk van elkaar. Dit wordt nagegaan aan de hand van de gemiddelde wachttijden. Om elk van de drie sluizen als een onafhankelijk en gesloten systeem te laten werken, werd een nieuw simulatiemodel opgesteld. In dit nieuw simulatiemodel worden de drie sluizen apart opgebouwd, zodat ze niet langer samen één systeem vormen. Dit betekent dat de data van aankomsten en afmetingen ook verschillend moeten zijn. Hiervoor worden telkens de werkelijke data gebruikt. Omdat elke sluis als een onafhankelijk onderdeel moet werken, mogen de werkelijke aankomsten niet gebruikt worden. Daarom werd voor het aankomstenpatroon aan elke sluis een statistische kansverdeling gebruikt. Hierdoor zijn de ingelezen aankomsttijden onafhankelijk en passeren toch nog steeds hetzelfde aantal schepen in het model. In tabel 20 is het resultaat te zien van deze berekening, die de afhankelijkheid bevestigt.

Som gemiddelde wachttijd, 1 systeem	4,1866
Som gemiddelde wachttijd, 3 geïsoleerde systemen	4,3378
$S < I$	$4,1866 < 4,3378$
Conclusie	Afhankelijk

**Tabel 20: analyse afhankelijkheid op basis van gemiddelde wachttijden (in uren)**

### 3.5.3 SYSTEEMTIJDEN

De twee systeemtijden die onderzocht worden, zijn de gemiddelde wachttijd en het aanbod. Het aanbod wordt bepaald door de totale tijd nodig om een schip te versassen. Gemakshalve zullen we de totale tijd die nodig is voor een versassing het aanbod noemen. In tabel 19 zijn de gemiddelde wachttijden per replicatie weergegeven met de bijhorende 95% betrouwbaarheidsintervallen. De hoogste gemiddelde wachttijd in stroomopwaartse richting is in Olen en bedraagt 0,76 uur, oftewel 45,6 minuten. Wanneer over de drie sluizen wordt gesommeerd wordt de totale gemiddelde wachttijd verkregen. Deze bedraagt stroomopwaarts 2,18 uur oftewel 130,8 minuten. Deze tijden zijn al best lang. Naast de gemiddelde wachttijden zijn de maximale wachttijden belangrijk. De maximale wachttijd is stroomopwaarts ook het grootst in Olen, namelijk 3,55 uur oftewel 213 minuten. De betrouwbaarheidsintervallen voor de gemiddelde wachttijden zijn weergegeven in de rechterkolom van tabel 21. Het 95% betrouwbaarheidsinterval betekent dat voor bijvoorbeeld Wijnegem stroomopwaarts, 95% kans is dat de gemiddelde wachttijd tussen 0,62 en 0,72 uur gelegen is. Er wordt verondersteld dat de gemiddelde wachttijden onafhankelijk en identiek verdeeld zijn uit een Normale verdeling, de voorwaarden voor een betrouwbaarheidsinterval op mogen stellen.

<i>Wachttijd</i>	<b>Gemiddeld</b>	<b>Max</b>	<b>Halve breedte</b>	<b>95% BI</b>	<b>95% BI</b>
<b>WSOW</b>	0,67	3,51	0,05	[0,67 ± 0,05]	[0,62 ; 0,72]
<b>OSOW</b>	<u>0,76</u>	<u>3,55</u>	0,10	[0,76 ± 0,10]	[0,66 ; 0,86]
<b>HSOW</b>	0,75	3,10	0,08	[0,75 ± 0,08]	[0,67 ; 0,83]
<b>HSAW</b>	0,65	<u>3,79</u>	0,05	[0,65 ± 0,05]	[0,60 ; 0,70]
<b>OSAW</b>	0,67	2,77	0,06	[0,67 ± 0,06]	[0,61 ; 0,73]
<b>WSAW</b>	<u>0,68</u>	2,76	0,07	[0,68 ± 0,07]	[0,61 ; 0,75]

**Tabel 21: Wachttijd (in uren)**

In tabel 22 is dezelfde samenvatting gegeven voor het aanbod. Het gemiddelde aanbod is het hoogst aan dezelfde sluizen als waar de gemiddelde wachttijden het hoogst zijn. De maximale tijden daarentegen zijn nu het hoogst in Ham voor beide stroomrichtingen. De betrouwbaarheidsintervallen zijn weergegeven in de rechterkolom van tabel 20. Hiervoor veronderstellen we dat de gemiddelde tijden een Normale verdeling volgen en onafhankelijk en identiek verdeeld zijn. Het betrouwbaarheidsinterval betekent voor Wijnegem stroomopwaarts dat er 95% kans is dat de gemiddelde aanbodtijd tussen 0,95 en 1,05 uur ligt.

<i>Aanbod</i>	<b>Gemiddeld</b>	<b>Max</b>	<b>Halve breedte</b>	<b>95% BI</b>	<b>95% BI</b>
<b>WSOW</b>	1,00	3,66	0,05	[1,00 ± 0,05]	[0,95 ; 1,05]
<b>OSOW</b>	<u>1,11</u>	3,95	0,11	[1,11 ± 0,11]	[1,00 ; 1,22]
<b>HSOW</b>	1,03	<u>4,26</u>	0,08	[1,03 ± 0,08]	[0,95 ; 1,21]
<b>HSAW</b>	0,93	<u>4,03</u>	0,06	[0,93 ± 0,06]	[0,87 ; 0,97]
<b>OSAW</b>	1,02	2,89	0,07	[1,02 ± 0,07]	[0,95 ; 1,09]
<b>WSAW</b>	<u>1,03</u>	3,26	0,07	[1,03 ± 0,07]	[0,96 ; 1,20]

**Tabel 22: Aanbod (in uren)**

### 3.5.4 CONCLUSIE

Per dag worden gemiddeld 42 schepen stroomafwaarts en 55 schepen stroomopwaarts versast in Wijnegem, Olen en Ham. Het aantal versassingen blijkt te dalen naarmate de schepen verder in het systeem gaan. Gemiddeld genomen is een versaste groep in elk van de sluisen even groot, namelijk drie à vier schepen. De verklaring hiervoor is dat schepen in groep een sluis verlaten en bijgevolg in groep aan de volgende sluis aankomen. De tussenaankomsten kunnen niet benaderd worden door een kansverdeling. Bovendien blijkt uit de toegepaste formule voor afhankelijkheid dat de totale wachttijd in het systeem kleiner is dan de som van de geïsoleerde individuele wachttijden. We mogen daarom besluiten dat de aankomsten afhankelijk zijn. Aangezien in de realiteit afhankelijkheid ook aanwezig is, bevestigen we hier een goede werking van het simulatiemodel. De gemiddelde wachttijden bedragen aan de sluis ongeveer een 40 tot 45 minuten. De maximale wachttijden liggen een stuk hoger, namelijk ongeveer tussen 166 en 227 minuten, wat toch wel hoog is. Het gemiddelde aanbod gemiddeld genomen ongeveer een uur. Het maximale aanbod ligt tussen 173 en 256 minuten. Dit wil zeggen dat aan bepaalde sluisen een schip meer dan vier uur nodig heeft om versast te worden. Dit is vanuit economisch perspectief te lang. Wel moet opgemerkt worden dat het simulatiemodel slechts één sluiskamer modelleert. In de realiteit zullen daarom de gemiddelde wachttijd en het aanbod dan ook lager liggen.

### 3.6 ONAFHANKELIJKE AANKOMSTEN

De idee achter afhankelijkheid is dat aankomsten aan een sluis afhankelijk zijn van de vertrekken aan de voorgaande sluis. Aangezien schepen in groepen worden versast, is het mogelijk dat onafhankelijke aankomsten worden geconverteerd in vertrekken die resulteren in afhankelijke aankomsten aan de volgende sluis. Daarom is de eerste verandering in het model het introduceren van onafhankelijke aankomsten, in plaats van de werkelijke aankomsten. Het doel is te bewijzen dat wanneer de aankomsten aan een sluis onafhankelijk zijn, de aankomsten aan de volgende sluisen wel afhankelijk zullen zijn. Dit houdt in dat de tussenaankomsten aan de volgende sluisen

niet kunnen benaderd worden door een statistische kansverdeling. De graad van afhankelijkheid wordt bepaald aan de hand van de significantie van de fit van de statistische kansverdeling. De kansverdeling is degene die volgens de Input Analyzer de beste fit geeft. Aangezien het doel een illustratie van het afhankelijkheidsaspect is, wordt de analyse beperkt tot de tussenaankomsttijden aan de vier sluizen.

### 3.6.1 BESCHRIJVING

In plaats van de aankomsttijden in te lezen, moeten deze geschat worden volgens een kansverdeling. Op deze manier zullen de tussenaankomsten onafhankelijk zijn. De gebruikte kansverdeling is degene die de beste fit geeft volgens de analyse uit sectie 3.2.3. Daar is terug te vinden dat voor Wijnegem stroomopwaarts de Beta verdeling de beste fit geeft, en voor Ham stroomafwaarts de Weibull verdeling. Concreet wil dit zeggen dat de stroomopwaartse aankomsten aan Wijnegem willekeurig zullen gebeuren volgens de formule " $8 * \text{BETA}(0.656; 11.2)$ " en de stroomafwaartse aankomsten aan Ham volgens de formule " $\text{WEIB}(0.415; 0.605)$ ". De aanpassingen aan het simulatiemodel zijn beperkt. De *Create* module wordt aangepast, zodat bovenstaande formules de aankomstenritmes bepalen en de twee modules **Read afmetingen** en **Separate** worden verwijderd voor beide stroomrichtingen.

### 3.6.2 RESULTATEN

De analyse van de vier sluizen zijn gegeven in bijlagen 22 tot en met 25. Hieruit blijkt dat aan alle vier de sluizen de tussenaankomsten niet kunnen benaderd worden door een statistische kansverdeling. Dit betekent dat de aankomsten niet onafhankelijk zijn. We hebben dan ook bewezen dat wanneer de systeemaankomsten onafhankelijk zijn, de aankomsten aan de volgende sluizen nog steeds afhankelijk zijn. In tabel 23 is de samenvatting gegeven voor de analyse.

<b>Onafh. aankomsten</b>	<b>Wijnegem SOW</b>	<b>Olen SOW</b>	<b>Ham SOW</b>	<b>Ham SAW</b>	<b>Olen SAW</b>	<b>Wijnegem SAW</b>
<b>Verdeling</b>	Beta	Lognormaal	Lognormaal	Weibull	Lognormaal	Lognormaal
<b>Test statistiek</b>	/	24.9	33.6	/	143	69
<b>p-waarde</b>	/	< 0.005	< 0.005	/	< 0.005	< 0.005
<b>Conclusie</b>	Onafhankelijk	Afhankelijk	Afhankelijk	Onafhankelijk	Afhankelijk	Afhankelijk

**Tabel 23: Samenvatting afhankelijkheidsanalyse bij onafhankelijke aankomsten**

---

### 3.6.3 CONCLUSIE

De aankomsten van het systeem werden veranderd van afhankelijk naar onafhankelijk. Dit gebeurde door de aankomsttijden te schatten aan de hand van een kansverdeling, in de plaats van ze in het model in te lezen. Ondanks de onafhankelijke invoer, tonen de resultaten aan dat de tussenaankomsttijden aan de volgende sluisen nog steeds afhankelijk zijn. De reden hiervoor ligt in het feit dat aan een sluis de willekeurige aankomende schepen worden gebundeld tot één groep, die vervolgens gezamenlijk wordt versast. Na de versassing varen de schepen verder naar de volgende sluis, waar de groep schepen nu ongeveer tegelijkertijd aankomt. Dit omdat ze op hetzelfde moment zijn vertrokken aan de voorgaande sluis. De willekeurige aankomsten aan de voorgaande sluis zijn met andere woorden verdwenen.

## 3.7 SENSITIVITEITSANALYSE

Het is belangrijk na te gaan of bepaalde veranderingen een verbetering in de wachttijden en afhankelijkheid met zich meebrengen. Hiervoor gaan we verschillende aanpassingen in het basismodel teweeg brengen en vervolgens een sensitiviteitsanalyse uitvoeren. Eerst wordt nagegaan wat een verandering in kritieke benutting teweegbrengt op vlak van afhankelijkheid. Een verandering in kritieke benutting gebeurt door het verhogen of verlagen van de sluiscapaciteit bij eenzelfde trafiek. Voor deze verandering wordt het effect op de wachttijden en systeemtijden niet geanalyseerd. Ten tweede wordt nagegaan wat het effect is van een verandering in de tijdsduur waarin op een volgend schip wordt gewacht, vooraleer te starten met de versassing. De idee is dat hoe langer wordt gewacht, hoe meer spreiding tussen de schepen verdwijnt. Minder spreiding betekent minder willekeurigheid in de aankomsten, zodat de afhankelijkheid stijgt.

---

### 3.7.1 KRITIEKE BENUTTING

Herinner dat de kritieke benutting de verhouding van de maximale trafiek tot de sluiscapaciteit is. Een verhoging in sluiscapaciteit bij eenzelfde trafiek zal de kritieke benutting doen dalen, en een daling zal het doen stijgen. In de literatuurstudie werd aangehaald dat hoe hoger de kritieke benutting, hoe hoger de afhankelijkheid. Een verhoging in sluiscapaciteit kan daarom een onafhankelijkheid introduceren in de aankomsten. Een verlaging is niet relevant aangezien dit mogelijk een verhoging in afhankelijkheid en bovendien de wachttijden zou betekenen. Daarom wordt in het model de sluiscapaciteit verhoogd met de oppervlakte van een gewoon sas, namelijk 2.176 m<sup>2</sup>. Om consistent te blijven wordt een marge van vijf procent genomen op de lengte en breedte, dit werd ook gedaan bij de berekening van de oorspronkelijke sluiscapaciteit. De effectieve nieuwe oppervlakte zal 6.295,84 m<sup>2</sup> bedragen, een stijging van ongeveer van 45 procentpunten.



---

### 3.7.1.1 Afhankelijkheid

Een daling in kritieke benutting, gerealiseerd door een verhoging in sluiscapaciteit, zou moeten resulteren in minder afhankelijkheid van de aankomsten. Daarom wordt nagegaan of de afhankelijkheid gedaald is door de introductie van de nieuwe sluiscapaciteit. Dit gebeurt aan de hand van een analyse op de tussenaankomsttijden in de Input Analyzer van Arena. De aankomsttijden van Wijnegem stroomopwaarts en Ham stroomafwaarts worden ingelezen, zodat deze tijden nog steeds afhankelijk blijven. In tabel 24 is de samenvatting van de analyse weergegeven. De voorgestelde kansverdeling voor de tussenaankomsten van Wijnegem stroomafwaarts is significant op het 1%, maar niet op het 5% significantieniveau (p-waarde = 0,0375). De overige drie verdelingen zijn allen niet significant op het 1% significantieniveau (p-waarden < 0,005). De conclusie die hieruit volgt is dat de stijging in sluiscapaciteit niet groot genoeg is om de kritieke benutting zodanig te doen dalen dat de aankomsten onafhankelijk worden.

	Olen SOW	Ham SOW	Olen SAW	Wijnegem SAW
<b>Verdeling</b>	Lognormaal	Lognormaal	Lognormaal	Lognormaal
<b>Test statistiek</b>	33.5	42.2	65.1	18
<b>p-waarde</b>	< 0.005	< 0.005	< 0.005	0.0375
<b>Conclusie</b>	Afhankelijk	Afhankelijk	Afhankelijk	Afhankelijk

**Tabel 24: Analyse aankomsten bij hogere sluiscapaciteit**

---

### 3.7.1.2 Conclusie

De verwachting was dat een verhoging in sluiscapaciteit zou zorgen voor een daling in kritieke benutting, resulterend in minder afhankelijke aankomsten. Echter zijn drie van de vier voorgestelde kansverdelingen niet significant op het 1% significantieniveau, en de overige op het 5% significantieniveau. De conclusie is daarom dat de stijging in sluiscapaciteit niet groot genoeg is om onafhankelijkheid te introduceren in de aankomsten.

---

## 3.7.2 MAXIMALE WACHTTIJD OP EEN VOLGEND SCHIP

Wanneer, vooraleer te starten met de versassing, langer wordt gewacht op een volgend schip, verdwijnt meer spreiding tussen de schepen individueel. Een lager gemiddelde spreiding betekent dat de aankomsten minder willekeurig zijn en dus afhankelijker. Het is daarom de verwachting dat wanneer minder lang wordt gewacht op schepen, de afhankelijkheid in aankomsten zal afnemen en zal stijgen wanneer langer wordt gewacht. In het basismodel wordt 36 minuten gewacht op een volgend schip. Deze tijd werd afgeleid uit de werkelijke gegevens, maar blijft toch arbitrair. We

gaan het effect op de wachttijd en afhankelijkheid na wanneer deze tijd daalt of stijgt. D.w.z. dat eerst 36 minuten in het basisscenario, 51 minuten in scenario A , 21 minuten in scenario B en tenslotte 10 minuten in scenario C gewacht wordt op een volgend schip.

### 3.7.2.1 Afhankelijkheid

We gaan nu na hoedanig de afhankelijkheid van de aankomsten verandert wanneer de maximale wachttijd op een volgend schip verandert. De aankomsten in het systeem worden nog steeds ingelezen zodat deze afhankelijk blijven. In het basisscenario wordt 36 minuten gewacht en zijn de aankomsten reeds afhankelijk. Wanneer we deze wachttijd verhogen tot 51 minuten, blijken de aankomsten nog steeds aan alle sluisen afhankelijk te zijn. De resultaten voor dit scenario zijn weergegeven in tabel 25. Dit is te verwachten omdat een langere wachttijd betekent dat meer schepen worden gegroepeerd, waardoor meer spreiding tussen schepen verdwijnt. Wanneer minder lang wordt gewacht, namelijk 21 minuten, dan is in tabel 26 te zien dat nog steeds alle aankomsten afhankelijk zijn, maar de test statistieken zijn reeds lager. Indien we nog een stapje verdergaan en slechts 10 minuten gewacht wordt (scenario C), wordt ook duidelijk dat aankomsten niet langer beduidend afhankelijk zijn. Voor Olen stroomopwaarts en Wijnegem stroomafwaarts is de voorgestelde verdeling significant op het 10% significantieniveau (p-waarde is groter dan 0.100). Ham stroomopwaarts en Olen stroomafwaarts daarentegen zijn slechts significant op het 1%, maar dit is niet voldoende om te mogen besluiten dat de aankomsten onafhankelijk zijn. De samenvatting van de analyse wordt gegeven in tabel 27.

<b>Scenario A</b>	<b>Olen SOW</b>	<b>Ham SOW</b>	<b>Olen SAW</b>	<b>Wijnegem SAW</b>
<b>Verdeling</b>	Weibull	Lognormaal	Lognormaal	Lognormaal
<b>Test statistiek</b>	97,8	32,3	71	45,5
<b>p-waarde</b>	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005
<b>Conclusie</b>	Afhankelijk	Afhankelijk	Afhankelijk	Afhankelijk

**Tabel 25: Samenvatting afhankelijkheidsanalyse scenario A**

<b>Scenario B</b>	<b>Olen SOW</b>	<b>Ham SOW</b>	<b>Olen SAW</b>	<b>Wijnegem SAW</b>
<b>Verdeling</b>	Weibull	Weibull	Lognormaal	Lognormaal
<b>Test statistiek</b>	42,5	36,6	23,9	36,6
<b>p-waarde</b>	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005
<b>Conclusie</b>	Afhankelijk	Afhankelijk	Afhankelijk	Afhankelijk

**Tabel 26: Samenvatting afhankelijkheidsanalyse scenario B**

<b>Scenario C</b>	<b>Olen SOW</b>	<b>Ham SOW</b>	<b>Olen SAW</b>	<b>Wijnegem SAW</b>
<b>Verdeling</b>	Weibull	Weibull	Lognormaal	Weibull
<b>Test statistiek</b>	14,16	18,18	21	12,5
<b>p-waarde</b>	0.105	0.0465	0.0219	0.141
<b>Conclusie</b>	Onafhankelijk	Afhankelijk	Afhankelijk	Onafhankelijk

**Tabel 27: Samenvatting afhankelijkheidsanalyse scenario C**

### 3.7.2.2 Wachtijd

We onderzoeken de gemiddelde en maximale wachttijden per scenario, gegeven in tabel 28. Voor elke combinatie van sluis en stroomrichting zijn de laagste gemiddelden en maximale wachttijden onderlijnd. Voor de gemiddelde wachttijden is het duidelijk te herkennen dat hoe minder lang wordt gewacht op een volgend schip, hoe lager de gemiddelde wachttijden zijn. De gemiddelde wachttijden zijn dan ook het laagst wanneer slechts tien minuten gewacht wordt (scenario C). De maximale wachttijden lijken geen consistent patroon te volgen. Ze liggen zowel hoger als lager dan het basisscenario. Het is wel opmerkelijk dat in scenario C de maximale wachttijden lager zijn dan die van het basisscenario, terwijl die van scenario B een aantal keer beduidend groter zijn. Indien de gemiddelde en maximale wachttijden in scenario C significant lager zijn dan in het basisscenario, zijn we een scenario gekomen waarin zowel de aankomsten onafhankelijker zijn als de wachttijden lager. We gaan de gemiddelde wachttijden na met een gepaarde t-test voor scenario A en B, maar niet voor C. Dit omdat zal blijken dat de wachttijden in B reeds significant lager zijn zodat die van C ook significant lager zijn. Voor de maximale wachttijden wordt de gepaarde t-test enkel uitgevoerd voor scenario C. Dit omdat enkel in dit scenario de aankomsten onafhankelijker zijn zodat dit scenario relevanter is.

<i>Wachttijd</i>	<b>Gem. Basis</b>	<b>Gem. A</b>	<b>Gem. B</b>	<b>Gem. C</b>	<b>Max. Basis</b>	<b>Max. A</b>	<b>Max. B</b>	<b>Max. C</b>
<b>WSOW</b>	0,67	0,91	0,49	<u>0,36</u>	3,51	3,78	4,34	<u>2,12</u>
<b>OSOW</b>	0,76	0,80	0,55	<u>0,44</u>	3,55	3,12	2,93	<u>2,81</u>
<b>HSOW</b>	0,75	0,96	0,56	<u>0,40</u>	3,10	4,30	4,70	<u>4,35</u>
<b>HSAW</b>	0,65	0,86	0,50	<u>0,42</u>	3,79	<u>3,99</u>	5,14	4,26
<b>OSAW</b>	0,67	0,79	0,52	<u>0,42</u>	2,77	3,18	<u>2,72</u>	2,80
<b>WSAW</b>	0,68	0,88	0,46	<u>0,35</u>	2,76	3,62	2,15	<u>1,83</u>

**Tabel 28: Gemiddelde en maximale wachttijden (in uur) per scenario**

3.7.2.3 Gepaarde t-test gemiddelde wachttijden scenario A

Vervolgens moeten we nagaan of de gemiddelde wachttijden significant verschillend zijn van elkaar. Dit gebeurt aan de hand van een gepaarde t-test. De bedoeling is om een betrouwbaarheidsinterval op te stellen, waaruit kan worden afgeleid of de scenario's significant verschillend zijn van elkaar. Dit is wanneer het betrouwbaarheidsinterval niet nul bevat. Het betrouwbaarheidsinterval bestaat dan uit enkel negatieve of positieve getallen. In het eerste geval zijn de gemiddelde wachttijden van scenario significant lager dan het basisscenario en in het tweede geval geldt het omgekeerde. Om deze test te mogen toepassen, moet voldaan zijn aan volgende voorwaarden:

- Het aantal replicaties zijn gelijk in elk scenario.
- De gemiddelde wachttijd is onafhankelijk en identiek verdeeld uit een Normaalverdeling.

De eerste voorwaarde is voldaan als elk scenario 25 replicaties bevat. De tweede voorwaarde wordt verondersteld voldaan te zijn.

De betrouwbaarheidsintervallen worden opgesteld aan de hand van volgende formule:

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

Met

- $\bar{Z}_{(n)}$  het gemiddelde van alle  $Z_j$
- $Z_j$  het verschil tussen  $X_{0j}$  en  $X_{1j}$ :  $(X_{0j} - X_{1j})$  (0 = basisscenario en 1 = scenario A)
- $X_{ij}$  de geobserveerde gemiddelde wachttijd in replicatie  $j$  van scenario  $i$ .
- $t_{n-1; 1-\frac{\alpha}{2}}$  de kritieke t-waarde voor de t-verdeling

- $n - 1$  het aantal vrijheidsgraden en  $n$  het aantal replicaties ( $n=25$ )
- $\alpha$  het significantieniveau ( $\alpha = 5\%$ )
- $\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)}) = \frac{\sum_{j=1}^n (Z_j - \bar{Z}_{(n)})^2}{n-1}$  de variantie van  $\bar{Z}_{(n)}$

Om het betrouwbaarheidsinterval te kunnen opstellen, moeten eerst de waarden voor  $\bar{Z}_{(25)}$ ,  $t_{24;0,975}$  en  $\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)})$  berekend worden. De t-waarde is terug te vinden in een tabel van t-waarden. De betrouwbaarheidsintervallen zijn weergegeven in tabel 29. De berekeningen voor deze intervallen zijn terug te vinden in bijlage 26 tot en met 31. Het is duidelijk dat alle intervallen, behalve dat van Olen stroomopwaarts, enkel negatieve getallen bevatten. Dit betekent dat de gemiddelde wachttijden in scenario A op het 5% significantieniveau significant hoger zijn dan de gemiddelde wachttijden in het basisscenario. Voor Olen stroomopwaarts geldt dat de gemiddelde wachttijd niet significant verschilt tussen de twee scenario's, omdat het betrouwbaarheidsinterval nul bevat.

Wijnegem stroomopwaarts	[-0,33 ; -0,14]
Olen stroomopwaarts	[-0,14 ; 0,06]
Ham stroomopwaarts	[-0,34 ; -0,10]
Ham stroomafwaarts	[-0,32 ; -0,14]
Olen stroomafwaarts	[-0,18 ; -0,04]
Wijnegem stroomafwaarts	[-0,30 ; -0,12]

**Tabel 29: BI gepaarde t-test van gemiddelde wachttijd basisscenario versus scenario A**

#### 3.7.2.4 Gepaarde t-test gemiddelde wachttijden scenario B

Voor scenario B, waarin 21 minuten wordt gewacht op een volgend schip vooraleer te starten met de versassing, voeren we eenzelfde gepaarde t-test uit. De betrouwbaarheidsintervallen zijn weergegeven in tabel 30. De berekeningen voor deze intervallen zijn terug te vinden in bijlage 32 tot en met 37. Alle betrouwbaarheidsintervallen bevatten enkel positieve getallen, zodat kan besloten worden dat op het 5% significantieniveau de gemiddelde wachttijden in scenario B significant lager zijn dan die in het basisscenario.

Wijnegem stroomopwaarts	[0,08 ; 0,28]
Olen stroomopwaarts	[0,10 ; 0,32]
Ham stroomopwaarts	[0,03 ; 0,33]
Ham stroomafwaarts	[0,04 ; 0,29]
Olen stroomafwaarts	[0,07 ; 0,25]
Wijnegem stroomafwaarts	[0,09 ; 0,30]

**Tabel 30: BI gepaarde t-test van gemiddelde wachttijd basisscenario versus scenario B**

---

3.7.2.5 Gepaarde t-test maximale wachttijden scenario C

De betrouwbaarheidsintervallen voor de gepaarde t-test zijn gegeven in tabel 31. Voor de berekening van deze betrouwbaarheidsintervallen wordt verwezen naar bijlage 38 tot en met 43. Enkel het betrouwbaarheidsinterval voor Ham stroomopwaarts bevat nul. Dit wil zeggen dat de maximale wachttijden in scenario C per replicatie niet significant verschillend zijn van die in het basisscenario. Weliswaar is de ondergrens van het interval '-0,01' zodat het nipt niet significant is. Alle andere intervallen bevatten enkel positieve getallen, zodat we mogen concluderen dat in scenario C de maximale wachttijden significant lager zijn dan in het basisscenario.

Wijnegem stroomopwaarts	[0,64; 1,18]
Olen stroomopwaarts	[0,39; 0,91]
Ham stroomopwaarts	[-0,01; 1,07]
Ham stroomafwaarts	[0,19 ; 1,07]
Olen stroomafwaarts	[0,31 ; 0,72]
Wijnegem stroomafwaarts	[0,57 ; 1,03]

**Tabel 31: BI gepaarde t-test van maximale wachttijd basisscenario versus scenario C**

---

3.7.2.6 Conclusie

In het basisscenario wordt gewacht met de versassing wanneer een volgend schip binnen 36 minuten zal arriveren. In scenario A is dit 51 minuten, in B 21 minuten en in C slechts 10 minuten. Indien langer wordt gewacht, zal de gemiddelde benutting stijgen en dalen indien minder lang wordt gewacht.

De resultaten van de afhankelijkheidsanalyse wijzen uit dat de aankomsten significant onafhankelijk zijn wanneer gewacht wordt met de versassing indien een volgend schip binnen de 10 minuten (scenario C) zal arriveren. Voor Olen stroomopwaarts en Wijnegem stroomafwaarts

betreft het een 10% significantieniveau. voor Ham stroomopwaarts en Olen stroomafwaarts betreft het een 1% significantieniveau. In de overige scenario's blijven de aankomsten afhankelijk.

Uit de analyse van de wachttijden concluderen we dat nagenoeg alle gemiddelde wachttijden significant verschillend zijn van elkaar op het 5% significantieniveau. De gepaarde t-test gaf enkel voor Olen stroomopwaarts in scenario A aan dat de gemiddelde wachttijden niet significant verschillend zijn van die in het basisscenario. Wanneer we deze sluis buiten beschouwing laten kan algemeen geconcludeerd worden dat hoe minder lang gewacht wordt op een volgend schip, hoe lager de gemiddelde wachttijden zijn. Omdat de gemiddelde wachttijden voor scenario B reeds significant waren, zijn deze voor scenario C ook significant lager. Voor scenario C werd daarom geen gepaarde t-test uitgevoerd voor de gemiddelde wachttijden, maar wel voor de maximale wachttijden. Deze lijken namelijk opmerkelijk lager te zijn dan in de andere scenario's. Hieruit blijkt dat enkel de maximale wachttijden van Ham stroomopwaarts niet significant lager zijn dan in het basisscenario.

De algemene conclusie is dat wanneer gewacht wordt met versassen wanneer een schip binnen tien minuten zal arriveren, de aankomsten onafhankelijker worden en zowel de gemiddelde als maximale wachttijden dalen. Wanneer minder lang wordt gewacht zal mogelijk de afhankelijkheid verder afnemen, maar de wachttijd zal vanaf een bepaald punt niet verder dalen en terug gaan stijgen. Er zal met andere woorden een bepaald optimum bestaan waarvoor de afhankelijkheid en wachttijden beiden gedaald zijn tot een minimum waarbij eventueel een trade-off moet gebeuren tussen onafhankelijkheid en een zo laag mogelijke wachttijd.

## HOOFDSTUK 4: CONCLUSIES

Het onderzoek van deze thesis behandelde de modellering van de wachttijden en de afhankelijkheid aan sluisen. Het doel was te onderzoeken welke mogelijkheden bestaan om beiden te reduceren. In dit hoofdstuk worden de conclusies van het onderzoek gegeven in vier delen. Eerst worden de belangrijkste conclusies uit de literatuurstudie besproken. Dit behandelt eerst de in de literatuur voorgestelde methoden om afhankelijkheid en wachttijden te reduceren. Als tweede wordt in dit eerste deel de verschillende methoden om wachttijden en afhankelijkheid aan sluisen te modelleren besproken. Vervolgens wordt de praktijkstudie besproken. Hierin worden de resultaten van het opgebouwde simulatiemodel eerst besproken en vervolgens de impact van enkele veranderingen. Het derde en vierde deel bestaan uit een bespreking van de beperkingen van het onderzoek en suggesties voor een toekomstig onderzoek.

### 4.1 UIT WETENSCHAPPELIJK ONDERZOEK

Wachttijden aan sluisen zorgen ervoor dat vaartuigen niet verder kunnen varen, met als gevolg dat bedrijven hier economisch gezien een nadeel aan hebben. Afhankelijkheid zorgt dan weer voor complexiteit in de sluiswerking. Het bemoeilijkt onderzoek naar verbeteringen in de efficiëntie van sluisen. In de wetenschappelijke literatuur worden een aantal mogelijkheden gegeven voor het reduceren van zowel wachttijden als afhankelijkheid. Voor de wachttijden is een eerste oplossing het inzetten van hulpbootjes. Deze bootjes helpen schepen te navigeren naar de sluiskamer, zodat de versassing op een veilige en snellere manier gebeurt. Ze zijn vooral nuttig aan drukke sluiscomplexen en havens. Een tweede oplossing is het implementeren van efficiënte prioriteitsregels. Wanneer van een First In First Out principe wordt overgeschakeld op een Shortest Processing First, brengt dit volgens de literatuur aanzienlijke verbeteringen met zich mee. Echter moet bij deze regel worden opgemerkt dat het nadelig is voor schepen die langere bedieningstijden hebben. De schepen met kortere bedieningstijden krijgen immers voorrang op hen, zodat zij langer in de wachtrij zullen staan dan onder FIFO. Daarom wordt aangeraden om met een eerlijkhedenbeperking te werken, namelijk Fairer Shortest Processing First. Deze prioriteitsregel werkt volgens de SPF regel, maar beperkt de voorrang zodat andere schepen niet te lang moeten wachten. Het is duidelijk dat deze eerlijkhedenbeperking de efficiëntie van het SPF principe vermindert. Daarom moet een afweging worden gemaakt tussen de efficiëntie en de eerlijkheid. In de literatuur zijn minder duidelijke mogelijkheden terug te vinden voor een reductie in afhankelijkheid. Afstand, hoeveelheid verkeer, infrastructuur, gehanteerde prioriteitsregels en de sluisbenutting komen aan bod als de factoren die een invloed hebben op afhankelijkheid. De eerste drie factoren kunnen niet veranderd worden tenzij grote ingrepen, de laatste twee factoren daarentegen wel. De belangrijkste is de sluisbenutting. De afhankelijkheid stijgt naarmate de kritieke benutting toeneemt, en de kritieke benutting stijgt naarmate ofwel de trafiek toeneemt ofwel de sluis capaciteit daalt. Aangezien in het model de trafiek onveranderd blijft, zal een verhoging in de sluis capaciteit zorgen voor een daling in kritieke benutting en daardoor mogelijk in



afhankelijkheid. Naast deze twee oplossingen is een derde en laatste mogelijke verbetering in afhankelijkheid te realiseren door de tijd waarin wordt gewacht op een volgend schip vooraleer te starten met de versassing, wordt verlaagd. Wanneer wordt gewacht op een volgend schip, verdwijnt de aanwezige spreiding tussen de schepen. Deze spreiding zorgt voor willekeurigheid in de aankomsten en daardoor mogelijk voor onafhankelijkheid. Daarom kan afhankelijkheid mogelijk verlaagd worden door deze tijd te verlagen.

Vooraleer een praktijkonderzoek kan worden uitgevoerd is het nodig om te weten hoe wachttijden en afhankelijkheid aan sluizen worden gemodelleerd. Uit de wetenschappelijke literatuur komen vier verschillende methodes naar voren. Elke methode heeft zijn voor- en nadelen, afhankelijk van het doel en de gewenste output. De eerste methode is de wachtrijtheorie. Met behulp van deze methode kan een eenvoudig model worden opgesteld over hoe een systeem zou kunnen werken op basis van assumpties en benaderingen. Op deze manier is het mogelijk reeds een idee te krijgen van de wachttijden in het systeem. De wachtrijtheorie houdt geen rekening met afhankelijkheid. Wanneer echter, zoals in dit onderzoek afhankelijkheid een belangrijk aspect is, moet overgegaan worden op één van de andere drie methoden: een simulatiemodel, een metamodel ofwel een kunstmatig (artificieel) neurale netwerk. Simulatiemodellen kunnen op een gedetailleerde manier een bestaand systeem nabootsen, maar vergen meer tijd om een output te bekomen. De resultaten van deze modellen zijn bijgevolg geen ruwe benadering meer. Wanneer de resultaten sneller nodig zijn zonder al te veel afbraak te doen aan de resultaten, is een metamodel een betere optie. Dit zijn modellen die worden opgesteld vanuit gesimuleerde data, d.w.z. dat een metamodel een simulatiemodel benadert. Het voordeel van een metamodel is dat het ten opzichte van een simulatiemodel een veel kortere tijd nodig heeft om tot resultaten te komen. Echter is een nadeel dat het opstellen van een metamodel complexer is. Dit voor- en nadeel is ook van toepassing voor een kunstmatig neurale netwerk, een alternatief voor een metamodel. Wanneer een te modelleren netwerk complexer is, is een kunstmatig neurale netwerk een betere keuze dan een metamodel. Omwille van het feit dat deze masterproef een bestaand sluizensysteem onderzoekt waarbij afhankelijkheid een belangrijk aspect is, is de beste keuze een simulatiemodel.

## 4.2 UIT PRAKTIJKONDERZOEK

De praktijkstudie werd uitgevoerd aan de hand van het computerprogramma Arena. Enerzijds werd op de door de Scheepvaart NV aangeleverde data van het binnenvaartverkeer een analyse uitgevoerd. Het betreft het waterverkeer van maart 2013 aan de sluis van Wijnegem, Olen en Ham. Deze data dienen als invoer voor het simulatiemodel. Uit deze analyse van de data bleek dat de tussenaankomsttijden aan Wijnegem stroomopwaarts en Ham stroomafwaarts niet kunnen worden benaderd door een kansverdeling. Dit betekent dat de aankomsten mogelijk niet onafhankelijk zijn. Verder is het duidelijk geworden dat in de aankomsten een patroon te herkennen is, namelijk dat de schepen in groepen aankomen aan een sluis. De verklaring voor dit patroon ligt waarschijnlijk bij de afhankelijkheid die geldt tussen de sluizen. Dit is bovendien een bevestiging van de mogelijk aanwezige afhankelijkheid, waardoor kan geconcludeerd worden dat

de aankomsten inderdaad afhankelijk zijn. Voor zowel de analyse van de aankomsttijden, de schipafmetingen en de bedieningstijden werd aan de hand van de Input Analyzer van Arena geen statistische verdeling gevonden met een significante fit. In het simulatiemodel worden de werkelijke geobserveerde tijden daarom ingelezen. Voor de analyse van de vaartijden werd eerst onderzocht of een relatie bestaat tussen de schipgrootte en de vaartijd. Hieruit blijkt dat dit niet het geval is, zodat niet kan gezegd worden dat kleine schepen sneller of trager dan grotere schepen naar een volgende sluis varen. Bovendien blijkt dat de verschillende vaartijden significant kunnen worden benaderd door kansverdelingen. Deze kansverdelingen worden dan ook gebruikt in het simulatiemodel om de vaartijden te benaderen. Het simulatiemodel bestaat uit de drie vermelde sluiscomplexen. Deze hebben elk twee gewone sluisen met een capaciteit van 2.176 m<sup>2</sup> (16m x 136m) en één duwvaartsluis met een capaciteit van 4.800 m<sup>2</sup> (24m x 200m). In het model wordt enkel de duwvaartsluis gesimuleerd en wordt een 5% marge op de afmetingen genomen, zodat de beschikbare capaciteit 4.332 m<sup>2</sup> (22,8m x 190) bedraagt. De resultaten van het simulatiemodel laten zien dat gemiddeld 42 schepen stroomafwaarts en 55 stroomopwaarts doorheen het systeem passeren per dag. De gemiddelde grootte van de versassing bedraagt drie à vier schepen en is vergelijkbaar over de drie sluisen, maar stijgt naarmate verder in het systeem. Dit komt waarschijnlijk door de aanwezige afhankelijkheid. De resultaten van de afhankelijkheidsanalyse op de sluisen laten zien dat alle drie de sluisen in beide richtingen afhankelijke aankomsten hebben, omdat ze niet geschat kunnen worden door een statistische kansverdeling. De gemiddelde wachttijden bedragen rond de drie kwartier per sluis. De maximale wachttijden bedragen ongeveer tussen de drie en bijna vier uur. Deze tijden zijn lang, maar dit komt grotendeels door het feit dat slechts één sluiskamer wordt gesimuleerd voor trafiek dat in werkelijkheid wordt versast via drie sluis kamers. Tenslotte is het gemiddeld aanbod, dat wordt bepaald door de totale tijd nodig om een schip te versassen, telkens ongeveer één uur. Het maximale aanbod daarentegen ligt opnieuw veel hoger, met grotendeels als oorzaak de hoge maximale wachttijden. Het aanbod zal net zoals de wachttijd in de realiteit lager liggen, omdat slechts één sluiskamer werd gesimuleerd.

Een eerste aanpassing aan het model vond plaats door de aankomsten te veranderen in onafhankelijke aankomsten. Dit om te bewijzen dat de aankomsten aan een volgende sluis nog steeds afhankelijk zijn, ongeacht of de aankomsten van de voorgaande sluisen onafhankelijk of afhankelijk zijn. De resultaten zijn bevredigend aangezien alle aankomsten, behalve de onafhankelijke aankomsten die als invoer voor het model dienen, significant kunnen worden benaderd door een statistische kansverdeling.

Vervolgens werd voor het basismodel (het eerste model) een sensitiviteitsanalyse uitgevoerd. Dit houdt in dat onderzocht werd wat het effect is op de afhankelijkheid en wachttijden bij een verandering in het model. De twee veranderingen die plaatsvinden, komen voort uit de literatuurstudie, namelijk het verlagen van de kritieke benutting, gerealiseerd door een verhoging in sluis capaciteit, en het veranderen van de wachttijd op een volgend schip vooraleer te starten met de versassing. De verwachting was dat een verhoging in sluis capaciteit zou zorgen voor een

daling in kritieke benutting, resulterend in minder afhankelijke aankomsten. De resultaten wijzen echter uit dat de toegepaste stijging in sluiscapaciteit geen onafhankelijkheid introduceert in de aankomsten. De verandering in de wachttijd op een volgend schip geeft daarentegen wel interessante resultaten. Deze analyse werd opgesplitst in vier scenario's: in het basisscenario wordt 36 minuten gewacht op een volgend schip, 51 minuten in scenario A, 21 minuten in scenario B en 10 minuten in scenario C. De afhankelijkheid werd opnieuw nagegaan aan de hand van het fitten van een kansverdeling. Hieruit bleek dat enkel in scenario C afhankelijkheidsgraad in de aankomsten afneemt. De p-waarden van de kansverdelingen zijn immers niet langer kleiner dan 0,005. In Olen stroomopwaarts en Wijnegem stroomafwaarts waren de voorgestelde Weibull verdelingen zelfs significant op het 10% significantieniveau, zodat duidelijk mag geconcludeerd worden dat de aankomsten onafhankelijk zijn geworden. Voor Ham stroomopwaarts en Olen stroomafwaarts zijn de aankomsten significant op het 1% significantieniveau, maar niet op het 5% significantieniveau. Dit wil zeggen dat wanneer de wachttijd op een volgend schip genoeg wordt verlaagd (10 minuten), de aankomsten niet langer beduidend afhankelijk zijn. De resultaten waren te verwachten, omdat een kortere wachttijd ervoor zal zorgen dat minder spreiding tussen schepen zal verdwijnen met als gevolg dat afhankelijkheid niet zo snel aanwezig zal zijn. Voor de gemiddelde wachttijden werd duidelijk dat wachttijd op een volgend schip en de gemiddelde wachttijd significant evenredig zijn met elkaar. De maximale wachttijden daarentegen zijn niet consistent evenredig. Wanneer langer (scenario A) wordt gewacht, zal de maximale wachttijd toenemen. Wanneer minder lang wordt gewacht (scenario B), neemt de maximale wachttijd ofwel toe ofwel af, maar wanneer de wachttijd slechts klein is (scenario C) zijn de maximale wachttijden significant lager. Hieruit kan afgeleid worden dat mogelijk een optimale wachttijd op een volgend schip moet worden gezocht in een sluisstelsel om een consistente daling in zowel gemiddelde als maximale wachttijd te verkrijgen. Uit deze volledige tweede verandering kan de interessante conclusie gemaakt worden dat door het genoeg verlagen van de tijd waarop op een volgend schip gewacht wordt vooraleer te starten met een versassing, zowel de afhankelijkheid als wachttijden op een positieve en significante manier veranderen.

#### 4.3 BEPERKINGEN VAN HET SIMULATIEMODEL

Het doel van een simulatiemodel is het nabootsen van een bestaand systeem. Het simulatiemodel in dit onderzoek benadert het bestaande sluisstelsel op het Albertkanaal zo goed als mogelijk, maar toch schuilen enkele beperkingen in het model. Hierdoor kunnen verschillen tussen de realiteit en de resultaten van dit onderzoek bestaan.

De belangrijkste beperking is dat slechts één sluiskamer wordt gesimuleerd. De resultaten zijn daarom inzake wachttijden waarschijnlijk afwijkend. In de realiteit zullen de wachttijden lager liggen, omdat hier voor dezelfde trafiek drie sluiskamers in plaats van één worden gebruikt. Voor een volledig en juist beeld dient een model met alle drie de sluiskamers opgesteld te worden. Dit simulatiemodel dient als basis voor dergelijk uitgebreider model.

Een tweede beperking is dat het een gesloten systeem betreft. Dit houdt in dat het simulatiemodel zo is opgebouwd dat een schip geen tussenstoppen maakt en enkel het systeem verlaat wanneer het de drie sluizen is gepasseerd. Dit is echter niet zoals het werkelijke sluisensysteem op het Albertkanaal werkt. Verschillende schepen stoppen aan terminals om te laden of te lossen of verlaten het systeem tussen twee sluizen in. Bovendien is het mogelijk dat een schip na een stop van richting wisselt, zodat het niet alle sluizen passeert vooraleer terug te keren naar waar het vandaan komt. Omdat het doel van een simulatiemodel het zo realistisch mogelijk nabouwen van een bestaand systeem is, vormt dit een beperking die kan worden opgelost door verder onderzoek.

Een derde beperking ligt in de toepassing van de prioriteitsregels in het model. In het simulatiemodel wordt de regel van FIFO onverkort toegepast. Dit wil zeggen dat het kan voorkomen dat een kleiner schip niet wordt doorgelaten naar de sluiskamer, indien het voorgaande schip te groot is voor nog te versassen. In de realiteit wordt hier door de sluismeester wel rekening mee gehouden. Bovendien zijn de voorrangsregels, die bovenop de FIFO regel bestaan, niet toegepast in het model. In de realiteit moeten deze regels wel gerespecteerd worden, omdat het deels gaat om gevaarlijke ladingen (springstoffen).

#### 4.4 TOEKOMSTIG ONDERZOEK

Het doel is het bestaande systeem zo goed als mogelijk na te bootsen. Een perfecte nabootsing van de realiteit is echter niet voor de hand liggend. Dit hebben de verschillende onderzoeken van de jaren 60 tot heden reeds uitgewezen. Wel is het mogelijk om zo veel mogelijk aspecten gradueel in het simulatiemodel op te nemen. Hiermee wordt bedoeld dat het continu verder bouwen op dit simulatiemodel uiteindelijk zorgt voor een model dat de realiteit zeer goed benadert.

Aangezien het simulatiemodel beperkt is tot slechts één sluiskamer, is het een meerwaarde om in een toekomstig onderzoek een simulatiemodel te bouwen dat alle sluis kamers modelleert. De sluis kamer die in deze studie werd gemodelleerd, is de duwvaartsluis. De overige twee sluis kamers die nog gemodelleerd moeten worden, zijn beiden een gewoon sas. Zo kan een onderscheid gemaakt worden tussen wachttijden voor kleinere schepen en wachttijden voor de duwvaart. Verder is omwille van de afhankelijkheid tussen sluizen de simulatie van alle zes de sluizen die gelegen zijn op Albertkanaal een interessante uitbreiding. Dit houdt in dat het model wordt uitgebreid met de sluiscomplexen van Hasselt, Diepenbeek en Genk.

Een derde suggestie is het systeem zodanig wijzigen dat het niet langer gesloten is. Het huidige model is een gesloten systeem, zodat schepen enkel het systeem kunnen verlaten na het passeren van de laatste sluis. Tussen de drie sluizen in, ondergaan de schepen geen additionele vertragingen (zoals bijvoorbeeld het laden of lossen aan een terminal), veranderen de schepen niet van richting en verlaten schepen het systeem niet alhoewel andere waterwegen aanwezig zijn. Een voorstel is het modelleren van terminals op een manier dat schepen een vertraging ondergaan (laden of lossen), waarna ze ofwel verder varen in dezelfde richting ofwel terugkeren.

Een vierde suggestie is de sensitiviteitsanalyse van de sluis capaciteit. Door een algemene beperking in hoeveelheid kon deze analyse niet meer uitgevoerd worden in deze masterproef. Toch kan deze verandering mogelijk een daling in afhankelijkheid betekenen.

Een laatste suggestie is onderzoek naar de optimale tijd om op een volgend schip te wachten vooraleer te starten met de versassing. Uit de praktijkstudie bleek dat wanneer deze wachttijd 10 minuten bedraagt, zowel een significante verbetering in afhankelijkheid als wachttijd plaatsvindt. Toch is het mogelijk dat wanneer de wachttijd nog meer wordt verkleind, bijvoorbeeld 2 minuten, dat de wachttijden terug zullen stijgen. Met andere woorden, de wachttijd is niet langer efficiënt omdat het nu te snel zal starten met een versassing. Wanneer langer dan 10 minuten wordt gewacht, kan de afhankelijkheid en wachttijd terug negatief veranderen. Het is dus mogelijk dat een bepaald optimum bestaat waarvoor de afhankelijkheid en wachttijden beiden gedaald zijn tot een minimum. Hierbij zal eventueel een trade-off moet gebeuren tussen onafhankelijkheid en een zo laag mogelijke wachttijd.

## REFERENTIELIJST

- Business.belgium.be *Transport en logistiek*. Opgevraagd 10 mei, 2013, via [http://business.belgium.be/nl/investeren\\_in\\_belgie/sleutelsectoren/transport\\_en\\_logistiek](http://business.belgium.be/nl/investeren_in_belgie/sleutelsectoren/transport_en_logistiek).
- Carroll, J.L. & Bronzini, M.S. (1973). Waterway transportation simulation models: Development and application. *Waterway Resources Research*, 9(1), 51-63.
- Dai, M. & Schonfeld, P. (1998). Metamodels for estimating waterway delays through series of queues. *Transportation Research Part B*, 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 (z.d.). *DSValbertkanaal*. Opgevraagd op 16 oktober, 2013, via <http://www.descheepvaart.be/Uploads/scheepvaart/DSValbertkanaal.pdf>.
- De Scheepvaart NV (z.d.). *Albertkanaal*. Opgevraagd op 20 april, 2013, via <http://www.descheepvaart.be/Rubriek/Beroepsvaart/Kanalen/Albertkanaal.aspx>.
- Deurganckdoksluis (2009). *Werkingsluit*. Opgevraagd op 16 oktober, 2013, via <http://www.deurganckdoksluis.be/werking-sluit>.
- Encyclo (2013). *Betekenis van een sluis*. Opgevraagd op 18 september, 2013, via <http://www.encyclo.nl/begrip/Sluis>.
- Federaal Planbureau (2009). *Langetermijnvooruitzichten voor transport in België: referentiescenario*. Opgevraagd op 11 mei, 2013, via <http://www.plan.be/press/communique-812-nl-27-67-langetermijnvooruitzichten+voor+transport+in+belgie+referentiescenario>.
- Feldman J.A. & Ballard, D.H. (1992). Connectionist Models and their Properties. *Cognitive science*, 6, 205-254.
- Fredj, S.B., Oueslati-Boulaïhia, S., Roberts, J.W. (2001). *Measurement-based admission control for elastic traffic*. Proceedings of the International Teletraffic Conference 17, Salvador (Brazil), 17 december 2001.
- Goldratt, E.M. (2004). *The Goal, a process of ongoing improvement, ed. 2*. North River Press.

- Kelton, W.D., Sadowski, R.P., & Swets, N.B. (2010). *Simulation with Arena, ed. 5*. New York: McGraw-Hill.
- Kim, M.Y. & Schonfeld, P. (1995). Neural network estimation of waterway lock service times. *Transportation Research Record*, 1497, 36-43.
- Kleinternaaien (2013). *Sluis van Ternaaien*. Opgevraagd op 17 oktober, 2013, via <http://kleinternaaien.com/attracties/stop-van-ternaaien/>.
- Koninklijk besluit, 15 oktober 1935 (1935). *Algemeen Reglement der Scheepvaartwegen van het Koninkrijk*. Opgevraagd op 8 december 2013, via [http://www.lexikon.eu/cd04/cd04n/binnen/recht/ges\\_be\\_06a.htm#art1](http://www.lexikon.eu/cd04/cd04n/binnen/recht/ges_be_06a.htm#art1).
- Kooman, C., de Bruijn, P.A. (1975). *Capaciteit en weerstand van een sluis*. Opgevraagd op 21 oktober, 2013, via <http://nl.scribd.com/doc/75566500/Capaciteit-en-weerstand-van-schutsluizen>.
- Lave, L.B. and DeSalvo, J.S. (1968). Congestion, tolls, and the economic capacity of a waterway. *Journal of Political Economy*, 76, 375-391.
- Martinelli, D., Dai, M., Schonfeld, P. & Antle, G. (1993). Methodology for planning efficient investments on inland waterways. *Transportation Research Record*, 1383, 48-57.
- Martinelli, D., & Schonfeld, P. (1995). Approximating delays at interdependent locks. *Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering*, 121(6), 300-307.
- Permanent International Association of Navigation Congresses (PIANC) (z.d.). *Final report of the international commission for the study of locks*. Opgevraagd op 21 oktober, 2013, via [http://books.google.be/books/about/Final\\_Report\\_of\\_the\\_International\\_Commis.html?id=aAwvJ5HWPIcC&redir\\_esc=y](http://books.google.be/books/about/Final_Report_of_the_International_Commis.html?id=aAwvJ5HWPIcC&redir_esc=y).
- Promotie Binnenvaart Vlaanderen (2008). *Waterwegenkaarten*. Opgevraagd op 7 december, 2013, via <http://www.binnenvaart.be/nl/waterwegen/waterwegenkaarten.asp#>.
- Raedts, M., Masui, C. (2007). *Van vraag tot tekst*. Leuven: Acco.
- Segers, L. (2013). Technisch hoofdassistent Genk. Genk.
- Smith, L.D., Sweeney II, D.C. & 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, 519-533.

- Synoniemen.net (2013). *Synoniemen sluis*. Opgevraagd op 18 september, 2013, via <http://synoniemen.net/index.php?zoekterm=sluis>.
- 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. (1998). Optimization through simulation of waterway transportation investments. *Transportation Research Record*, 1620, 11-16.
- Ting, C.J. & Schonfeld, P. (2001). Efficiency versus Fairness in Priority Control: Waterway Lock Case. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 127(2), 82-88.
- Van Dale (2103). *Betekenis sluis*. Opgevraagd op 18 september, 2013, via [http://www.vandale.nl/opzoeken?pattern=sluis&lang=nn#.U4oytvI\\_sVk](http://www.vandale.nl/opzoeken?pattern=sluis&lang=nn#.U4oytvI_sVk).
- Vandewalle, E. (2009). Binnentransport over Albertkanaal bespaart ons ontzettend veel fileleed. *Wijzers*. Opgevraagd op 18 oktober, 2013, via <http://www.wijzers.be/2009/03/binnentransport-over-albertkanaal-bespaart-ons-ontzettend-veel-fileleed/>.
- Vlaams Overheid departement Mobiliteit en Openbare Werken, (z.d.). *Beheer van bevaarbare waterwegen*. Opgevraagd op 17 oktober, 2013, via <http://www.vlaanderen.be/nl/mobiliteit-en-openbare-werken/lucht-en-scheepvaart/beheer-van-de-bevaarbare-waterwegen>.
- 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. (2007). Demand elasticity and benefit measurement in a waterway simulation model. *Transportation Research Record*, 3033, 53-61.
- Wilson, W.W. (2006). Vessel, firm and lock efficiency measures on lock performance. *Transportation Research Record*, 1963, 1-8.
- Young, H.D. & Freedman, R.A. (2008). *University Physics, ed. 12*. San Francisco: Pearson Education.
- 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

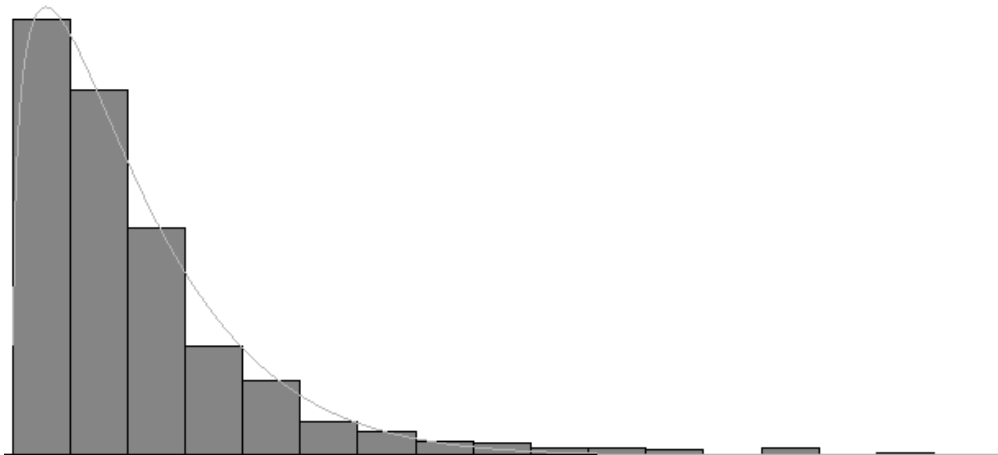
### TUSSENAANKOMSTEN

#### **Bijlage 1: Histogram & samenvatting tussenaankomsttijden Wijnegem stroomopwaarts**



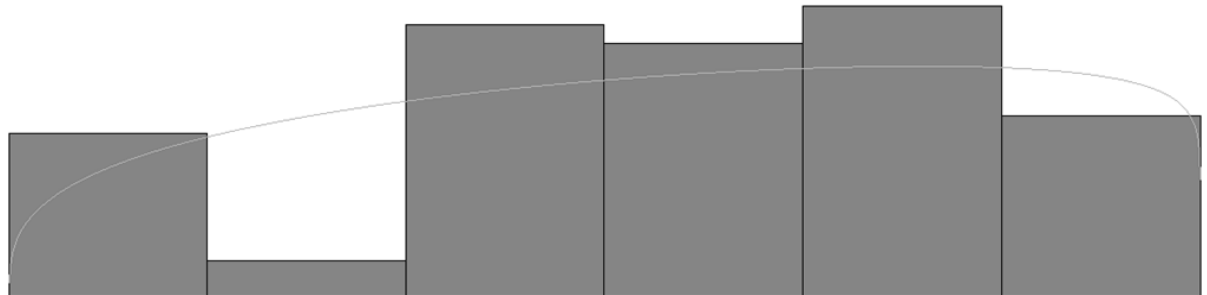
<i>Verdeling</i>		<i>Data</i>	
Verdeling:	Beta	Aantal Data	= 1416
Uitdrukking:	$8 * \text{BETA}(0.656, 11.2)$	Min Data Waarde	= 0
Kwadr. fout:	0.000828	Max Data Waarde	= 7.3
<i>Chi Square Test</i>		Gemiddelde	= 0.435
Aantal intervallen	= 8	Standaardafwijking	= 0.618
Vrijheidsgraden	= 5		
Test Statistiek	= 31		
P-waarde	< 0.005		

**Bijlage 2: Histogram en samenvatting tussenaankomsttijden van groepen, Wijnegem stroomopwaarts**



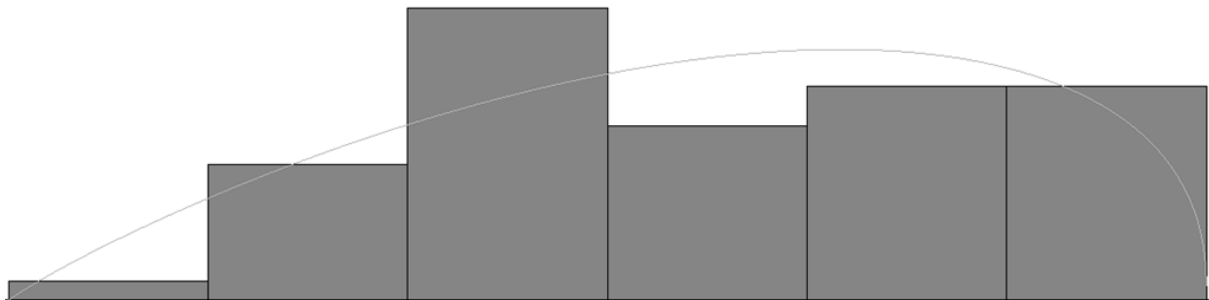
<i>Verdeling</i>		<i>Data</i>	
Verdeling:	Beta	Aantal Data	= 976
Uitdrukking:	8 * BETA(1.33, 18.4)	Min Data Waarde	= 0
Kwadr. fout:	0.001170	Max Data Waarde	= 7.3
<i>Chi Square Test</i>		Gemiddelde	= 0.596
Aantal intervallen	= 8	Standaardafwijking	= 0.681
Vrijheidsgraden	= 5		
Test Statistiek	= 66.8		
P-waarde	< 0.005		

**Bijlage 3: Histogram en samenvatting tussenaankomsten van woensdag 6 maart 2013, Wijnegem stroomopwaarts**



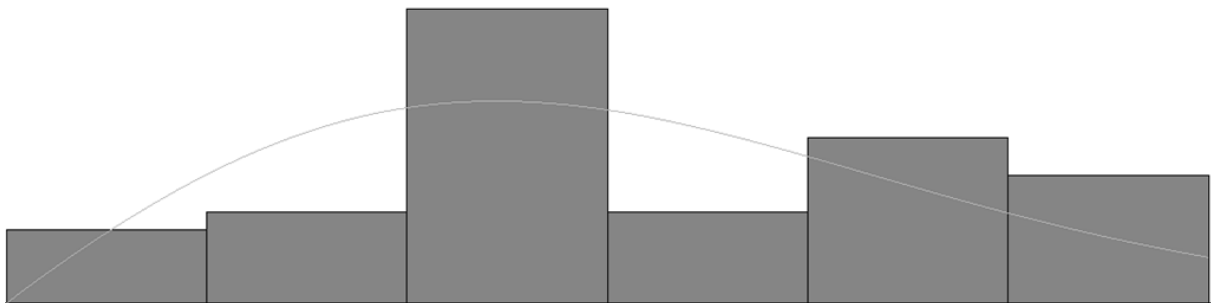
<i>Verdeling</i>		<i>Data</i>	
Verdeling:	Beta	Aantal Data	= 66
Uitdrukking:	$24 * \text{BETA}(1.32, 1.1)$	Min Data Waarde	= 0.012
Kwadr. fout:	0.022417	Max Data Waarde	= 23.8
<i>Chi Square Test</i>		Gemiddelde	= 13.1
Aantal intervallen	= 6	Standaardafwijking	= 6.46
Vrijheidsgraden	= 3		
Test Statistiek	= 9.58		
P-waarde	= 0.0233		

**Bijlage 4: Histogram en samenvatting van tussenaankomsten op woensdag 13 maart 2013, Ham stroomafwaarts**



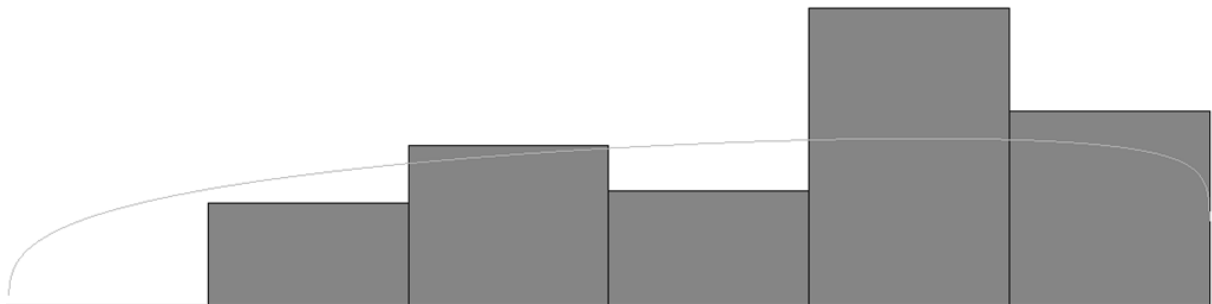
<i>Verdeling</i>		<i>Data</i>	
Verdeling:	Beta	Aantal Data	= 40
Uitdrukking:	24 * BETA(1.81, 1.31)	Min Data Waarde	= 0.763
Kwadr. fout:	0.007795	Max Data Waarde	= 23.4
<i>Chi Square Test</i>		Gemiddelde	= 13.8
Aantal intervallen	= 5	Standaardafwijking	= 5.71
Vrijheidsgraden	= 2		
Test Statistiek	= 1.13		
P-waarde	= 0.579		
<hr/>			
Verdeling:	Beta		
Uitdrukking:	24 * BETA(1.91, 1.4)		
<i>Chi Square Test</i>			
Test Statistiek	= 3.08		
P-waarde	= 0.0836		

**Bijlage 5: Histogram en samenvatting van tussenaankomsten op vrijdag 8 maart 2013, Ham stroomafwaarts**



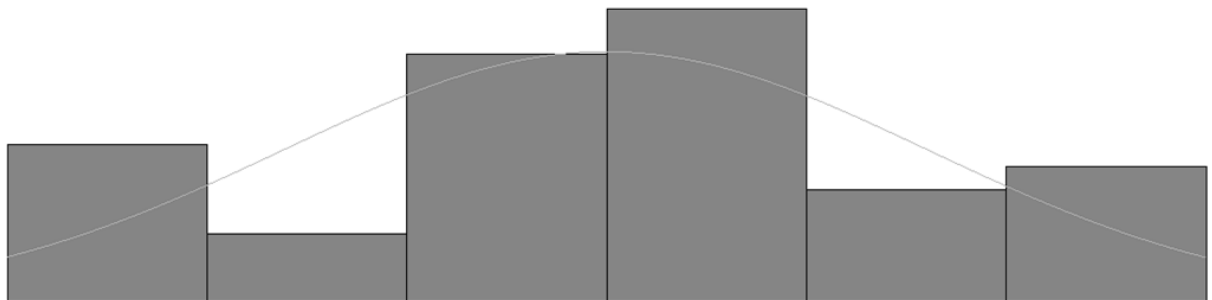
<i>Verdeling</i>		<i>Data</i>	
Verdeling:	Weibull	Aantal Data	= 45
Uitdrukking:	WEIB(14.1, 1.95)	Min Data Waarde	= 2.33
Kwadr. fout:	0.038210	Max Data Waarde	= 23.7
<i>Chi Square Test</i>		Gemiddelde	= 13.2
Aantal intervallen	= 4	Standaardafwijking	= 6.39
Vrijheidsgraden	= 1		
Test Statistiek	= 10.2		
P-waarde	< 0.005		

**Bijlage 6: Histogram en samenvatting van tussenaankomsten op woensdag 13 maart 2013, Wijnegem stroomopwaarts**



<i>Verdeling</i>		<i>Data</i>	
Verdeling:	Beta	Aantal Data	= 75
Uitdrukking:	24 * BETA(1.32, 1.1)	Min Data Waarde	= 4.502
Kwadr. fout:		Max Data Waarde	= 22.4
<i>Chi Square Test</i>		Gemiddelde	= 14.8
Aantal intervallen	= 6	Standaardafwijking	= 4.97
Vrijheidsgraden	= 3		
Test Statistiek	= 19.4		
P-waarde	< 0.005		

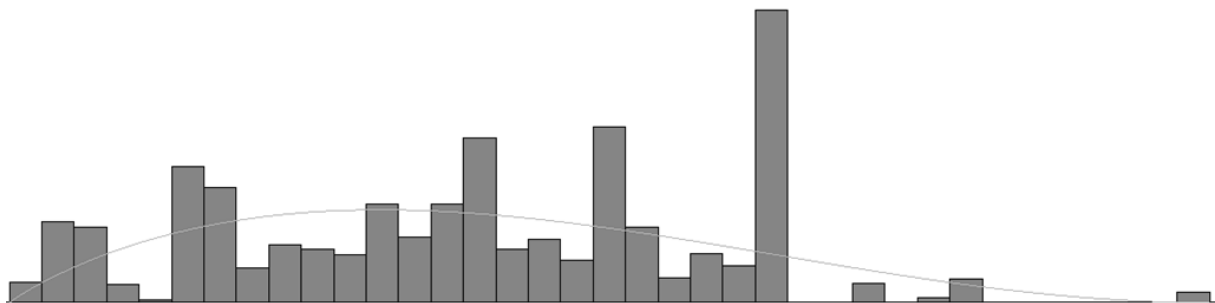
**Bijlage 7: Histogram en samenvatting van tussenaankomsten op vrijdag 8 maart 2013, Wijnegem stroomopwaarts**



<i>Verdeling</i>		<i>Data</i>	
Verdeling:	Normaal	Aantal Data	= 45
Uitdrukking:	NORM(12, 6.46)	Min Data Waarde	= 0.102
Kwadr. fout:	0.024152	Max Data Waarde	= 23.1
<i>Chi Square Test</i>		Gemiddelde	= 12
Aantal intervallen	= 4	Standaardafwijking	= 6.53
Vrijheidsgraden	= 1		
Test Statistiek	= 1.38		
P-waarde	= 0.244		
<hr/>			
Verdeling:	Beta		
Uitdrukking:	24 * BETA(1.32, 1.1)		
<i>Chi Square Test</i>			
Test Statistiek	= 6.05		
P-waarde	= 0.0489		

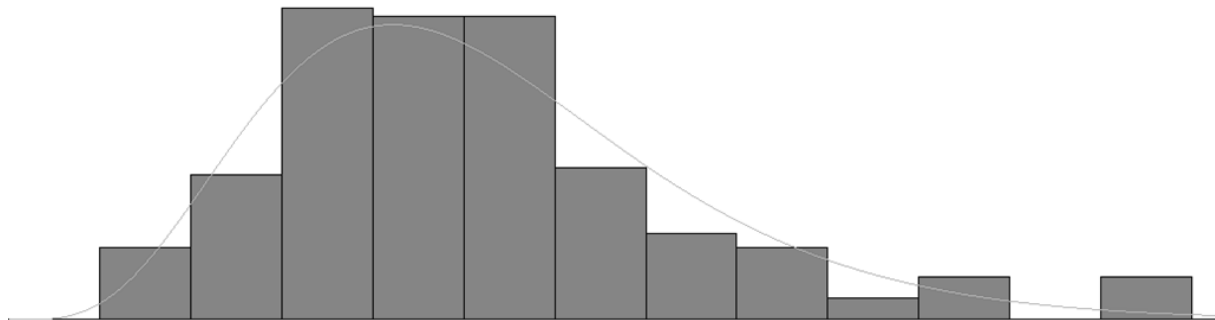


**Bijlage 8: Histogram en samenvatting van schipafmetingen, Wijnegem stroomopwaarts**



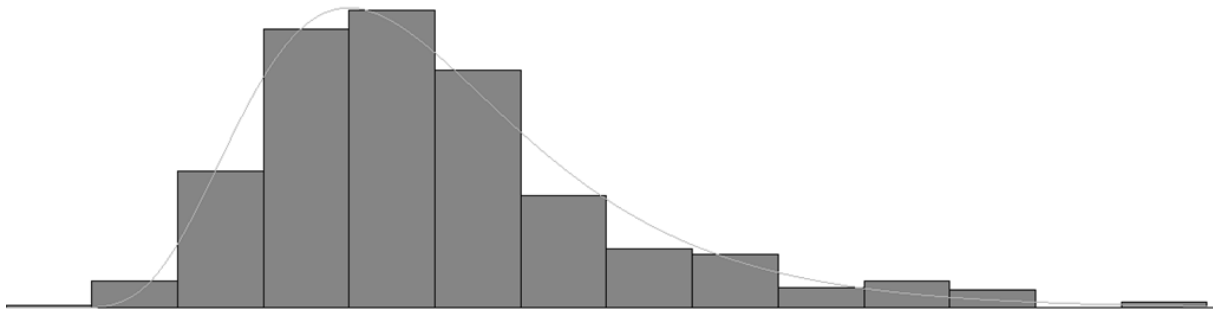
<i>Verdeling</i>		<i>Data</i>	
Verdeling:	Beta	Aantal Data	= 1416
Uitdrukking:	$55 + 1890 * \text{BETA}(1.92, 3.05)$	Min Data Waarde	= 55.3
Kwadr. fout:	0.028398	Max Data Waarde	= 1942
<i>Chi Square Test</i>		Gemiddelde	= 783
Aantal intervallen	= 31	Standaardafwijking	= 376
Vrijheidsgraden	= 28		
Test Statistiek	= 1480		
P-waarde	< 0.005		

**Bijlage 9: vaartijden 1 maart t.e.m. 7 maart, Ham – Olen stroomafwaarts**



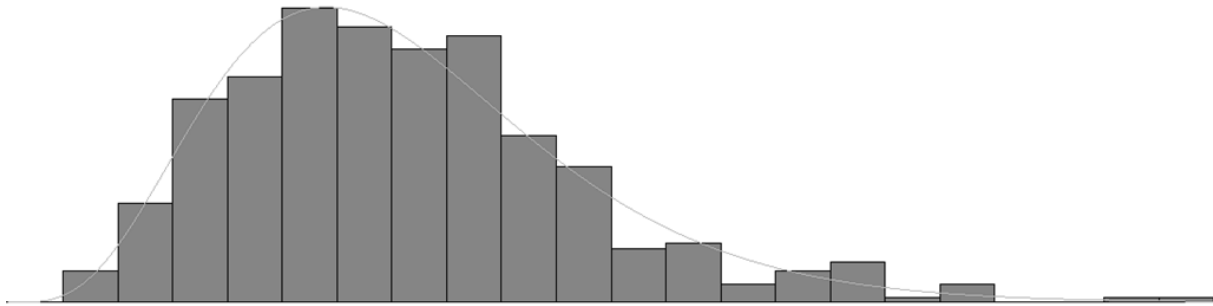
<i>Verdeling</i>		<i>Data</i>	
Verdeling:	Lognormaal	Aantal Data	= 215
Uitdrukking:	$0.62 + \text{LOGN}(0.676, 0.277)$	Min Data Waarde	= 0.81
Kwadr. fout:	0.003147	Max Data Waarde	= 2.18
<i>Chi Square Test</i>		Gemiddelde	= 1.3
Aantal intervallen	= 8	Standaardafwijking	= 0.276
Vrijheidsgraden	= 5		
Test Statistiek	= 2.83		
P-waarde	= 0.727		

**Bijlage 10: vaartijden 1 maart t.e.m. 14 maart, Ham – Olen stroomafwaarts**



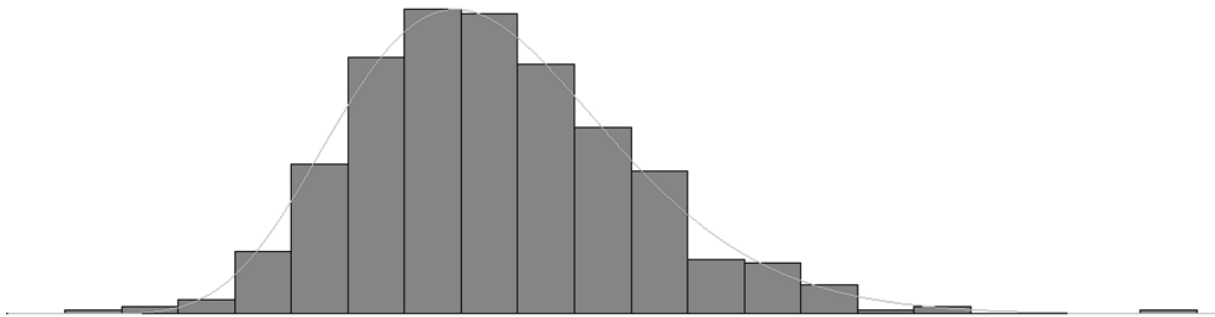
<i>Verdeling</i>		<i>Data</i>	
Verdeling:	Lognormaal	Aantal Data	= 430
Uitdrukking:	$0.62 + \text{LOGN}(0.676, 0.277)$	Min Data Waarde	= 0.81
Kwadr. fout:	0.001565	Max Data Waarde	= 2.48
<i>Chi Square Test</i>		Gemiddelde	= 1.29
Aantal intervallen	= 8	Standaardafwijking	= 0.284
Vrijheidsgraden	= 5		
Test Statistiek	= 6.88		
P-waarde	= 0.235		

**Bijlage 11: vaartijden maart 2013, Wijnegem – Olen stroomopwaarts**



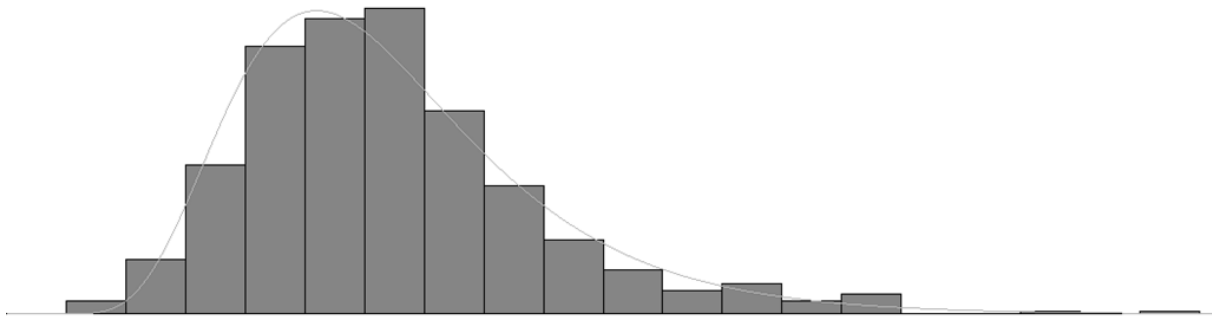
<i>Verdeling</i>		<i>Data</i>	
Verdeling:	Erlang	Aantal Data	= 484
Uitdrukking:	$1 + \text{ERLA}(0.184, 5)$	Min Data Waarde	= 1.14
Kwadr. fout:	0.001531	Max Data Waarde	= 2.48
<i>Chi Square Test</i>		Gemiddelde	= 1.92
Aantal intervallen	= 13	Standaardafwijking	= 0.416
Vrijheidsgraden	= 10		
Test Statistiek	= 13.3		
P-waarde	= 0.219		

**Bijlage 12: vaartijden maart 2013, Olen – Ham stroomopwaarts**



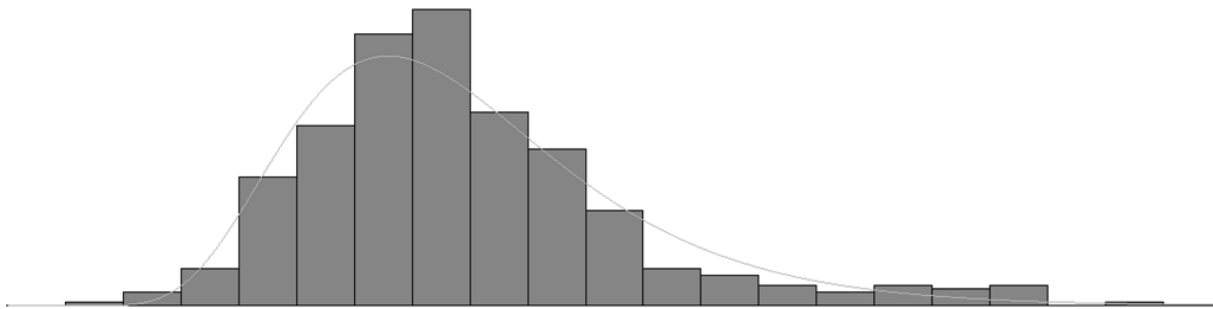
<i>Verdeling</i>		<i>Data</i>	
Verdeling:	Erlang	Aantal Data	= 499
Uitdrukking:	$0.6 + \text{ERLA}(0.0991, 12)$	Min Data Waarde	= 0.6
Kwadr. fout:	0.000436	Max Data Waarde	= 3.02
<i>Chi Square Test</i>		Gemiddelde	= 1.43
Aantal intervallen	= 11	Standaardafwijking	= 0.399
Vrijheidsgraden	= 8		
Test Statistiek	= 3.56		
P-waarde	> 0.75		

**Bijlage 13: vaartijden maart 2013, Ham – Olen stroomafwaarts**



<i>Verdeling</i>		<i>Data</i>	
Verdeling:	Lognormaal	Aantal Data	= 481
Uitdrukking:	$0.62 + \text{LOGN}(0.702, 0.28)$	Min Data Waarde	= 0.81
Kwadr. fout:	0.001739	Max Data Waarde	= 2.71
<i>Chi Square Test</i>		Gemiddelde	= 1.32
Aantal intervallen	= 11	Standaardafwijking	= 0.275
Vrijheidsgraden	= 8		
Test Statistiek	= 9.45		
P-waarde	= 0.317		

**Bijlage 14: vaartijden maart 2013, Olen – Wijnegem stroomafwaarts**



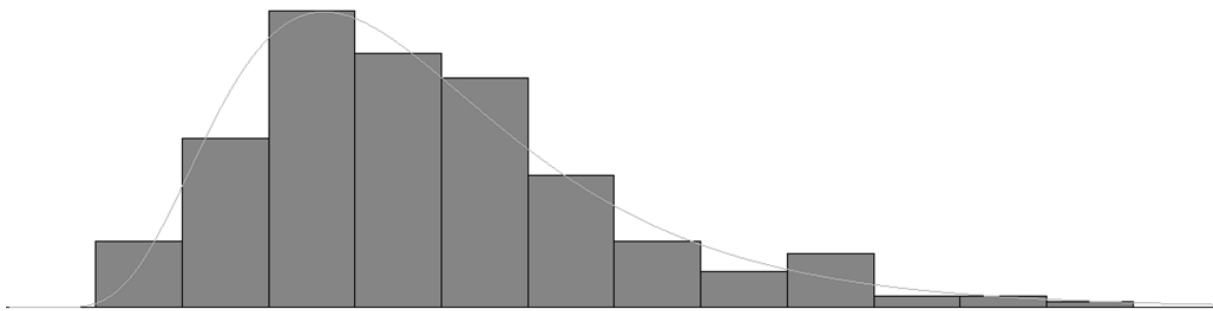
<i>Verdeling</i>		<i>Data</i>	
Verdeling:	Lognormaal	Aantal Data	= 453
Uitdrukking:	$0.6 + \text{LOGN}(1.14, 0.415)$	Min Data Waarde	= 0.86
Kwadr. fout:	0.003630	Max Data Waarde	= 3.37
<i>Chi Square Test</i>		Gemiddelde	= 1.74
Aantal intervallen	= 11	Standaardafwijking	= 0.415
Vrijheidsgraden	= 8		
Test Statistiek	= 17.2		
P-waarde	= 0.0297		

**Bijlage 15: tussenaankomsten Olen stroomopwaarts**

<i>Verdeling</i>		<i>Data</i>	
Verdeling:	Lognormaal	Aantal Data	= 694
Uitdrukking:	$10 * \text{BETA}(0.3, 3.01)$	Min Data Waarde	= 0.00
Kwadr. fout:	0.000704	Max Data Waarde	= 9.84
<i>Chi Square Test</i>		Gemiddelde	= 0.887
Aantal intervallen	= 12	Standaardafwijking	= 1.37
Vrijheidsgraden	= 9		
Test Statistiek	= 13.7		
P-waarde	= 0.147		

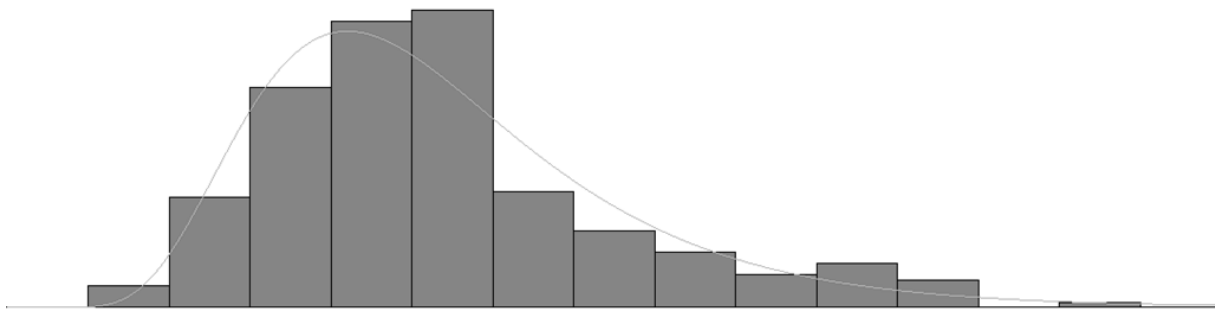


**Bijlage 16: vaartijden maart 2013, Wijnegem – Olen stroomopwaarts**

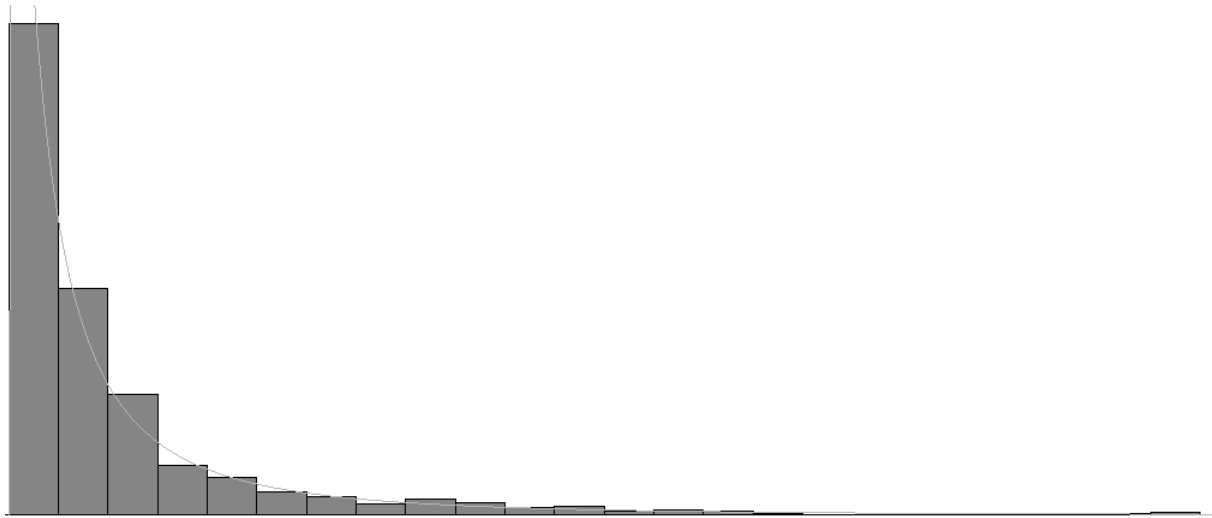


<i>Verdeling</i>		<i>Data</i>	
Verdeling:	Lognormaal	Aantal Data	= 221
Uitdrukking:	$1 + \text{LOGN}(0.997, 0.47)$	Min Data Waarde	= 1.23
Kwadr. fout:	0.002252	Max Data Waarde	= 3.6
<i>Chi Square Test</i>		Gemiddelde	= 1.99
Aantal intervallen	= 7	Standaardafwijking	= 0.437
Vrijheidsgraden	= 4		
Test Statistiek	= 2.14		
P-waarde	= 0.712		

**Bijlage 17: vaartijden maart 2013, Ham – Olen stroomafwaarts**



<i>Verdeling</i>		<i>Data</i>	
Verdeling:	Lognormaal	Aantal Data	= 235
Uitdrukking:	$0.64 + \text{LOGN}(0.719, 0.307)$	Min Data Waarde	= 0.81
Kwadr. fout:	0.005952	Max Data Waarde	= 2.47
<i>Chi Square Test</i>		Gemiddelde	= 1.36
Aantal intervallen	= 8	Standaardafwijking	= 0.297
Vrijheidsgraden	= 5		
Test Statistiek	= 10.3		
P-waarde	= 0.0699		

**Bijlage 18: Tussenaankomsten Olen stroomopwaarts**

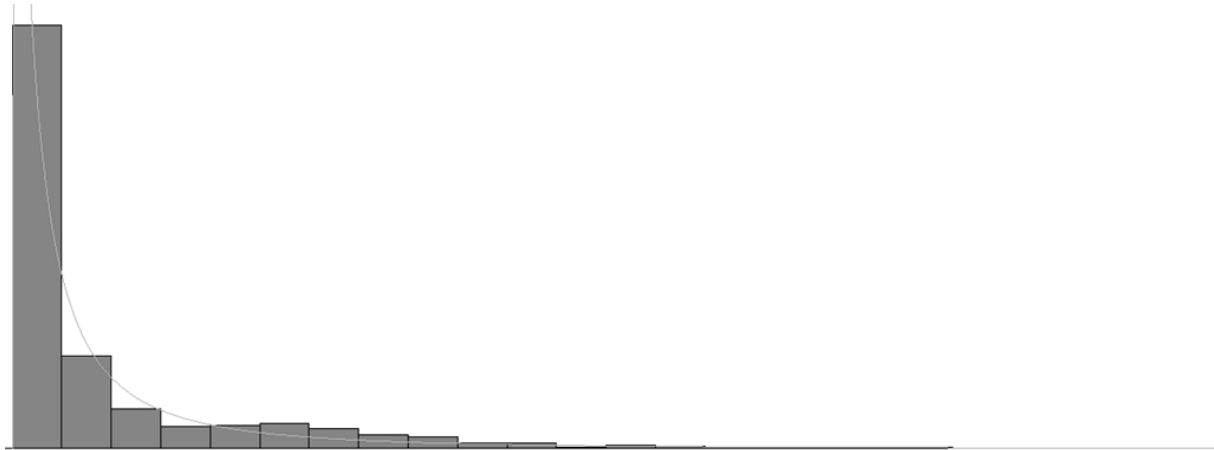
<i>Verdeling</i>		<i>Data</i>	
Verdeling:	Lognormaal	Aantal Data	= 1.377
Uitdrukking:	LOGN(0.525, 1.36)	Min Data Waarde	= 0.00
Kwadr. fout:	0.002656	Max Data Waarde	= 6.82
<i>Chi Square Test</i>		Gemiddelde	= 0.433
Aantal intervallen	= 15	Standaardafwijking	= 0.649
Vrijheidsgraden	= 12		
Test Statistiek	= 36.1		
P-waarde	< 0.005		

### **Bijlage 19: Tussenaankomsten Ham stroomopwaarts**



<i>Verdeling</i>		<i>Data</i>	
Verdeling:	Lognormaal	Aantal Data	= 1.365
Uitdrukking:	LOGN(0.552, 1.7)	Min Data Waarde	= 0.00
Kwadr. fout:	0.001172	Max Data Waarde	= 7.16
<i>Chi Square Test</i>		Gemiddelde	= 0.435
Aantal intervallen	= 14	Standaardafwijking	= 0.702
Vrijheidsgraden	= 11		
Test Statistiek	= 38.8		
P-waarde	< 0.005		

**Bijlage 20: Tussenaankomsten Olen stroomafwaarts**



<i>Verdeling</i>		<i>Data</i>	
Verdeling:	Lognormaal	Aantal Data	= 1058
Uitdrukking:	LOGN(0.674, 2.22)	Min Data Waarde	= 0.00
Kwadr. fout:	0.002147	Max Data Waarde	= 8.59
<i>Chi Square Test</i>		Gemiddelde	= 0.566
Aantal intervallen	= 12	Standaardafwijking	= 0.922
Vrijheidsgraden	= 9		
Test Statistiek	= 65.5		
P-waarde	< 0.005		

## **Bijlage 21: Tussenaankomsten Wijnegem stroomafwaarts**



<i>Verdeling</i>		<i>Data</i>	
Verdeling:	Lognormaal	Aantal Data	= 1055
Uitdrukking:	LOGN(0.681, 2)	Min Data Waarde	= 0.00
Kwadr. fout:	0.002093	Max Data Waarde	= 9.58
<i>Chi Square Test</i>		Gemiddelde	= 0.564
Aantal intervallen	= 12	Standaardafwijking	= 0.922
Vrijheidsgraden	= 9		
Test Statistiek	= 28.8		
P-waarde	< 0.005		

**Bijlage 22: Tussenaankomsten Olen stroomopwaarts**



<i>Verdeling</i>		<i>Data</i>	
Verdeling:	Lognormaal	Aantal Data	= 1264
Uitdrukking:	LOGN(0.549, 1.63)	Min Data Waarde	= 0.00
Kwadr. fout:	0.001272	Max Data Waarde	= 8.2
<i>Chi Square Test</i>		Gemiddelde	= 0.472
Aantal intervallen	= 12	Standaardafwijking	= 0.852
Vrijheidsgraden	= 9		
Test Statistiek	= 24.9		
P-waarde	< 0.005		

### **Bijlage 23: Tussenaankomsten Ham stroomopwaarts**



<i>Verdeling</i>		<i>Data</i>	
Verdeling:	Lognormaal	Aantal Data	= 1255
Uitdrukking:	LOGN(0.549, 1.63)	Min Data Waarde	= 0.00
Kwadr. fout:	0.001743	Max Data Waarde	= 7.59
<i>Chi Square Test</i>		Gemiddelde	= 0.471
Aantal intervallen	= 13	Standaardafwijking	= 0.849
Vrijheidsgraden	= 10		
Test Statistiek	= 33.6		
P-waarde	< 0.005		



## **Bijlage 24: Tussenaankomsten Olen stroomafwaarts**



<i>Verdeling</i>		<i>Data</i>	
Verdeling:	Lognormaal	Aantal Data	= 967
Uitdrukking:	LOGN(0.584, 2.22)	Min Data Waarde	= 0.00
Kwadr. fout:	0.014121	Max Data Waarde	= 10.8
<i>Chi Square Test</i>		Gemiddelde	= 0.617
Aantal intervallen	= 9	Standaardafwijking	= 1.38
Vrijheidsgraden	= 6		
Test Statistiek	= 143		
P-waarde	< 0.005		

## **Bijlage 25: Tussenaankomsten Wijnegem stroomafwaarts**



<i>Verdeling</i>		<i>Data</i>	
Verdeling:	Lognormaal	Aantal Data	= 956
Uitdrukking:	LOGN(0.635, 1.94)	Min Data Waarde	= 0.00
Kwadr. fout:	0.004854	Max Data Waarde	= 10.4
<i>Chi Square Test</i>		Gemiddelde	= 0.62
Aantal intervallen	= 10	Standaardafwijking	= 1.27
Vrijheidsgraden	= 7		
Test Statistiek	= 69		
P-waarde	< 0.005		

**Bijlage 26: Wijnegem stroomopwaarts**

Replicatie	$X_{0j}$	$X_{1j}$	$Z_j$	$Z_j - \bar{Z}_{(25)}$
1	0,6639	0,9312	-0,2673	0,000816
2	0,4606	0,5677	-0,1071	0,017328
3	0,6710	0,9698	-0,2988	0,003608
4	0,5706	1,0003	-0,4297	0,036467
5	0,8473	0,7120	0,1353	0,139903
6	0,7243	0,8198	-0,0955	0,020517
7	0,8468	0,7500	0,0968	0,112584
8	0,5703	0,8724	-0,3021	0,004015
9	0,6655	0,9643	-0,2988	0,003608
10	0,7026	1,4549	-0,7523	0,263748
11	0,5787	0,9022	-0,3235	0,007185
12	0,6221	1,0390	-0,4169	0,031742
13	0,6067	0,7327	-0,1260	0,012709
14	0,7042	0,9393	-0,2351	1,32E-05
15	0,8311	0,7605	0,0706	0,095689
16	0,7323	1,5183	-0,7860	0,299498
17	0,7618	1,0340	-0,2722	0,00112
18	0,7073	0,8100	-0,1027	0,018506
19	0,5567	0,9065	-0,3498	0,012335
20	0,7059	0,8224	-0,1165	0,014942
21	0,6614	1,0284	-0,3670	0,016452
22	0,8658	0,8158	0,0500	0,083368
23	0,6954	0,8173	-0,1219	0,013651
24	0,6575	0,8459	-0,1884	0,002534
25	0,3650	0,7285	-0,3635	0,015566

$$\bar{Z}_{(25)} = \frac{\sum_{j=1}^{25} Z_j}{25} = -0,24$$

$$t_{24;0,975} = 2,064$$

$$\widehat{var}(\bar{Z}_{(25)}) = \frac{\sum_{j=1}^{25} (Z_j - \bar{Z}_{(25)})^2}{24} = 0,051163$$

$$BI: \bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1;1-\frac{\alpha}{2}} * \sqrt{\frac{\widehat{var}(\bar{Z}_{(n)})}{n}} = -0,24 \pm 2,064 * \sqrt{\frac{0,051163}{25}} = [-0,33 ; -0,14]$$

**Bijlage 27: Olen stroomopwaarts**

Replicatie	$X_{0j}$	$X_{1j}$	$Z_j$	$Z_j - \bar{Z}_{(25)}$
1	0,6312	0,8420	-0,2108	0,028890481
2	0,6894	0,6312	0,0582	0,009806545
3	0,5989	0,9674	-0,3685	0,10736894
4	0,5941	0,7858	-0,1917	0,02276236
5	1,0697	0,9628	0,1069	0,021823562
6	0,6364	0,7271	-0,0907	0,002487216
7	0,8781	0,7199	0,1582	0,039612145
8	0,653	0,7234	-0,0704	0,000874503
9	0,6302	0,9685	-0,3383	0,088489591
10	1,2599	0,7884	0,4715	0,26247998
11	1,5088	0,8794	0,6294	0,449205572
12	0,5656	0,8979	-0,3323	0,084955927
13	0,5956	0,7585	-0,1629	0,014901573
14	0,6614	0,9124	-0,2510	0,04417227
15	1,0647	0,7075	0,3572	0,158426289
16	0,7929	0,7791	0,0138	0,002984218
17	0,8325	0,8160	0,0165	0,0032865
18	0,58	0,8455	-0,2655	0,050477508
19	0,7405	0,7787	-0,0382	6,90638E-06
20	0,3662	0,5773	-0,2111	0,028992554
21	0,7949	0,7326	0,0623	0,010635384
22	0,6266	0,6924	-0,0658	0,000623601
23	0,7847	0,7980	-0,0133	0,000757791
24	0,6877	0,8748	-0,1871	0,021395498
25	0,7354	0,8325	-0,0971	0,003166538

$$\bar{Z}_{(25)} = \frac{\sum_{j=1}^{25} Z_j}{25} = -0,04$$

$$t_{24;0,975} = 2,064$$

$$\widehat{Var}(\bar{Z}_{(25)}) = \frac{\sum_{j=1}^{25} (Z_j - \bar{Z}_{(25)})^2}{24} = 0,06077431$$

$$BI: \bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1;1-\frac{\alpha}{2}} * \sqrt{\frac{\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)})}{n}} = -0,04 \pm 2,064 * \sqrt{\frac{0,06077431}{25}} = [-0,14; 0,06]$$

**Bijlage 28: Ham stroomopwaarts**

Replicatie	$X_{0j}$	$X_{1j}$	$Z_j$	$Z_j - \bar{Z}_{(25)}$
1	0,5158	0,7338	-0,2180	7,66182E-06
2	0,6952	0,8841	-0,1889	0,001015569
3	0,5985	0,8435	-0,2450	0,00058719
4	0,7405	1,3897	-0,6492	0,183553979
5	0,8117	0,9828	-0,1711	0,00246691
6	0,6894	0,7474	-0,0580	0,026493422
7	0,6606	0,8990	-0,2384	0,000310887
8	1,0128	1,2959	-0,2831	0,003885278
9	0,6569	0,8823	-0,2254	2,14554E-05
10	0,9779	1,3543	-0,3764	0,024221319
11	0,6461	0,8834	-0,2373	0,000273307
12	0,4973	0,8011	-0,3038	0,006894313
13	0,5875	0,7235	-0,1360	0,007185614
14	1,2633	0,8944	0,3689	0,34770835
15	0,9453	1,8581	-0,9128	0,478908289
16	0,4309	0,9526	-0,5217	0,090560069
17	0,523	1,1330	-0,6100	0,15150155
18	0,7849	0,7759	0,0090	0,052793334
19	0,5034	0,8223	-0,3189	0,009629889
20	0,6391	0,8298	-0,1907	0,000904085
21	0,9576	0,7989	0,1587	0,143995963
22	0,941	0,6844	0,2566	0,227880207
23	0,6622	1,2191	-0,5569	0,112984721
24	0,9208	0,9116	0,0092	0,052885281
25	0,8984	0,7784	0,1200	0,11612283

$$\bar{Z}_{(25)} = \frac{\sum_{j=1}^{25} Z_j}{25} = -0,22$$

$$t_{24;0,975} = 2,064$$

$$\widehat{Var}(\bar{Z}_{(25)}) = \frac{\sum_{j=1}^{25} (Z_j - \bar{Z}_{(25)})^2}{24} = 0,085116311$$

$$BI: \bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1;1-\frac{\alpha}{2}} * \sqrt{\frac{\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)})}{n}} = -0,22 \pm 2,064 * \sqrt{\frac{0,085116311}{25}} = [-0,34; -0,10]$$

**Bijlage 29: Ham stroomafwaarts**

Replicatie	$X_{0j}$	$X_{1j}$	$Z_j$	$Z_j - \bar{Z}_{(25)}$
1	0,6312	0,8420	-0,2108	0,028890481
2	0,6894	0,6312	0,0582	0,009806545
3	0,5989	0,9674	-0,3685	0,10736894
4	0,5941	0,7858	-0,1917	0,02276236
5	1,0697	0,9628	0,1069	0,021823562
6	0,6364	0,7271	-0,0907	0,002487216
7	0,8781	0,7199	0,1582	0,039612145
8	0,653	0,7234	-0,0704	0,000874503
9	0,6302	0,9685	-0,3383	0,088489591
10	1,2599	0,7884	0,4715	0,26247998
11	1,5088	0,8794	0,6294	0,449205572
12	0,5656	0,8979	-0,3323	0,084955927
13	0,5956	0,7585	-0,1629	0,014901573
14	0,6614	0,9124	-0,2510	0,04417227
15	1,0647	0,7075	0,3572	0,158426289
16	0,7929	0,7791	0,0138	0,002984218
17	0,8325	0,8160	0,0165	0,0032865
18	0,5800	0,8455	-0,2655	0,050477508
19	0,7405	0,7787	-0,0382	6,90638E-06
20	0,3662	0,5773	-0,2111	0,028992554
21	0,7949	0,7326	0,0623	0,010635384
22	0,6266	0,6924	-0,0658	0,000623601
23	0,7847	0,7980	-0,0133	0,000757791
24	0,6877	0,8748	-0,1871	0,021395498
25	0,7354	0,8325	-0,0971	0,003166538

$$\bar{Z}_{(25)} = \frac{\sum_{j=1}^{25} Z_j}{25} = -0,23$$

$$t_{24;0,975} = 2,064$$

$$\widehat{var}(\bar{Z}_{(25)}) = \frac{\sum_{j=1}^{25} (Z_j - \bar{Z}_{(25)})^2}{24} = 0,046446967$$

$$BI: \bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1;1-\frac{\alpha}{2}} * \sqrt{\frac{\widehat{var}(\bar{Z}_{(n)})}{n}} = -0,23 \pm 2,064 * \sqrt{\frac{0,046446967}{25}} = [-0,32; -0,14]$$

**Bijlage 30: Olen stroomafwaarts**

Replicatie	$X_{0j}$	$X_{1j}$	$Z_j$	$Z_j - \bar{Z}_{(25)}$
1	0,5826	0,8729	-0,2902	0,03377094
2	0,4487	0,6883	-0,2396	0,017729122
3	0,5145	0,7863	-0,2718	0,027334234
4	0,6891	0,5741	0,1150	0,049032604
5	0,5305	0,6311	-0,1006	3,47638E-05
6	0,5791	0,7436	-0,1645	0,003374391
7	0,5827	0,4544	0,1282	0,055072239
8	0,7465	0,7892	-0,0426	0,004070041
9	0,5685	0,8491	-0,2806	0,030342059
10	0,7981	0,7761	0,0220	0,01648985
11	0,8142	1,2232	-0,4089	0,091505032
12	0,7645	1,0426	-0,2782	0,029487249
13	0,6573	0,8580	-0,2007	0,008883486
14	0,5913	0,4234	0,1679	0,075256039
15	0,5544	0,5821	-0,0277	0,006208774
16	0,7910	0,9502	-0,1591	0,002776756
17	0,6872	0,6624	0,0248	0,017225206
18	0,5960	0,7178	-0,1219	0,000238471
19	0,8416	0,6219	0,2197	0,106361246
20	0,6429	0,6065	0,0364	0,020407849
21	0,6527	0,7014	-0,0487	0,003336067
22	1,0778	1,1796	-0,1018	2,14388E-05
23	0,6558	0,9899	-0,3342	0,051850665
24	0,6449	0,8592	-0,2143	0,011633814
25	0,8622	0,9519	-0,0897	0,000280393

$$\bar{Z}_{(25)} = \frac{\sum_{j=1}^{25} Z_j}{25} = -0,11$$

$$t_{24;0,975} = 2,064$$

$$\widehat{Var}(\bar{Z}_{(25)}) = \frac{\sum_{j=1}^{25} (Z_j - \bar{Z}_{(25)})^2}{24} = 0,027613447$$

$$BI: \bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1;1-\frac{\alpha}{2}} * \sqrt{\frac{\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)})}{n}} = -0,11 \pm 2,064 * \sqrt{\frac{0,027613447}{25}} = [-0,18; -0,04]$$

**Bijlage 31: Winegem stroomafwaarts**

Replicatie	$X_{0j}$	$X_{1j}$	$Z_j$	$Z_j - \bar{Z}_{(25)}$
1	0,6967	1,0366	-0,3399	0,016804384
2	0,3668	0,5950	-0,2282	0,000318892
3	1,0112	1,0557	-0,0445	0,027508863
4	0,7012	1,0828	-0,3816	0,029325429
5	0,6644	0,6969	-0,0325	0,031636893
6	0,8015	1,1121	-0,3106	0,010061723
7	0,4509	0,7167	-0,2659	0,003084108
8	0,5346	0,9591	-0,4245	0,045859589
9	0,6161	0,8602	-0,2442	0,001144867
10	0,5619	0,7178	-0,1559	0,002961483
11	1,0388	0,6089	0,4299	0,409843601
12	0,7777	0,7768	0,0009	0,044602035
13	0,6870	0,6865	0,0005	0,044434561
14	0,7862	1,2383	-0,4521	0,058434761
15	0,6055	0,6656	-0,0601	0,022555814
16	0,7868	0,9735	-0,1867	0,000558638
17	0,7063	1,2715	-0,5652	0,125963244
18	0,6840	0,9391	-0,2551	0,002003329
19	0,7414	0,8717	-0,1303	0,006404072
20	0,6082	0,8702	-0,2620	0,00267109
21	0,5809	1,1031	-0,5222	0,097274826
22	0,8911	1,3451	-0,4539	0,059341571
23	0,6248	0,9876	-0,3628	0,023259847
24	0,8337	0,7530	0,0808	0,084729797
25	0,4471	0,5390	-0,0919	0,014018396

$$\bar{Z}_{(25)} = \frac{\sum_{j=1}^{25} Z_j}{25} = -0,21$$

$$t_{24;0,975} = 2,064$$

$$\widehat{Var}(\bar{Z}_{(25)}) = \frac{\sum_{j=1}^{25} (Z_j - \bar{Z}_{(25)})^2}{24} = 0,048533409$$

$$BI: \bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1;1-\frac{\alpha}{2}} * \sqrt{\frac{\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)})}{n}} = -0,21 \pm 2,064 * \sqrt{\frac{0,048533409}{25}} = [-0,30 ; -0,12]$$



**Bijlage 32: Wijnegem stroomopwaarts**

Replicatie	$X_{0j}$	$X_{1j}$	$Z_j$	$Z_j - \bar{Z}_{(25)}$
1	0,6639	0,3954	0,2685	0,00777433
2	0,4606	0,3652	0,0954	0,007217907
3	0,6710	0,4073	0,2637	0,006943833
4	0,5706	0,2956	0,2750	0,008956273
5	0,8473	0,7735	0,0738	0,011346247
6	0,7243	0,3751	0,3492	0,028519912
7	0,8468	0,4233	0,4235	0,05913814
8	0,5703	0,4141	0,1562	0,000584106
9	0,6655	0,5096	0,1559	0,000595169
10	0,7026	1,4061	-0,7035	0,781123337
11	0,5787	0,8736	-0,2949	0,22585545
12	0,6221	0,4175	0,2046	0,000587974
13	0,6067	0,2378	0,3689	0,035558399
14	0,7042	0,4969	0,2073	0,000726712
15	0,8311	0,6737	0,1574	0,000528472
16	0,7323	0,5182	0,2141	0,001141259
17	0,7618	0,4897	0,2721	0,008427218
18	0,7073	0,4082	0,2991	0,014097593
19	0,5567	0,3066	0,2501	0,004867176
20	0,7059	0,3378	0,3681	0,035265892
21	0,6614	0,6311	0,0303	0,02250469
22	0,8658	0,4135	0,4523	0,073944218
23	0,6954	0,4828	0,2126	0,001043295
24	0,6575	0,3750	0,2825	0,010431123
25	0,3650	0,2388	0,1262	0,002927804

$$\bar{Z}_{(25)} = \frac{\sum_{j=1}^{25} Z_j}{25} = 0,18$$

$$t_{24;0,975} = 2,064$$

$$\widehat{var}(\bar{Z}_{(25)}) = \frac{\sum_{j=1}^{25} (Z_j - \bar{Z}_{(25)})^2}{24} = 0,056254439$$

$$BI: \bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1;1-\frac{\alpha}{2}} * \sqrt{\frac{\widehat{var}(\bar{Z}_{(n)})}{n}} = 0,18 \pm 2,064 * \sqrt{\frac{0,056254439}{25}} = [0,08 ; 0,28]$$

**Bijlage 33: Olen stroomopwaarts**

Replicatie	$X_{0j}$	$X_{1j}$	$Z_j$	$Z_j - \bar{Z}_{(25)}$
1	0,6312	0,5254	0,1058	0,010780264
2	0,6894	0,6104	0,0790	0,017067533
3	0,5989	0,7336	-0,1347	0,118551835
4	0,5941	0,6601	-0,0660	0,07598599
5	1,0697	0,9140	0,1557	0,00290703
6	0,6364	0,3469	0,2895	0,006389562
7	0,8781	0,3969	0,4812	0,07376794
8	0,6530	0,6413	0,0117	0,039167782
9	0,6302	0,7245	-0,0943	0,092371723
10	1,2599	0,4333	0,8266	0,38073591
11	1,5088	0,4993	1,0095	0,639867465
12	0,5656	0,3885	0,1771	0,001058728
13	0,5956	0,3341	0,2615	0,002697201
14	0,6614	0,5867	0,0747	0,018192197
15	1,0647	0,7172	0,3475	0,019020743
16	0,7929	0,4579	0,3350	0,01572176
17	0,8325	0,5280	0,3045	0,009003591
18	0,5800	0,4319	0,1481	0,003787345
19	0,7405	0,4664	0,2741	0,004158356
20	0,3662	0,4655	-0,0993	0,095400557
21	0,7949	0,6340	0,1609	0,002375418
22	0,6266	0,5994	0,0272	0,03327566
23	0,7847	0,6205	0,1642	0,00206545
24	0,6877	0,6002	0,0875	0,014914529
25	0,7354	0,4221	0,3133	0,010742333

$$\bar{Z}_{(25)} = \frac{\sum_{j=1}^{25} Z_j}{25} = 0,21$$

$$t_{24;0,975} = 2,064$$

$$\widehat{Var}(\bar{Z}_{(25)}) = \frac{\sum_{j=1}^{25} (Z_j - \bar{Z}_{(25)})^2}{24} = 0,070416954$$

$$BI: \bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1;1-\frac{\alpha}{2}} * \sqrt{\frac{\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)})}{n}} = 0,21 \pm 2,064 * \sqrt{\frac{0,070416954}{25}} = [0,10 ; 0,32]$$

**Bijlage 34: Ham stroomopwaarts**

Replicatie	$X_{0j}$	$X_{1j}$	$Z_j$	$Z_j - \bar{Z}_{(25)}$
1	0,5158	0,4509	0,0649	0,012840233
2	0,6952	0,3790	0,3162	0,019031128
3	0,5985	0,5596	0,0389	0,019407506
4	0,7405	0,6626	0,0779	0,010079364
5	0,8117	0,3886	0,4231	0,059971762
6	0,6894	1,6280	-0,9386	1,24731513
7	0,6606	0,3501	0,3105	0,017483863
8	1,0128	0,4525	0,5603	0,145994452
9	0,6569	0,4563	0,2006	0,000498888
10	0,9779	0,6100	0,3679	0,035960866
11	0,6461	0,4389	0,2072	0,000840313
12	0,4973	0,2939	0,2034	0,000630272
13	0,5875	0,3808	0,2067	0,000810625
14	1,2633	0,5791	0,6842	0,255957841
15	0,9453	0,5756	0,3697	0,036654025
16	0,4309	0,5300	-0,0991	0,076945498
17	0,5230	0,4723	0,0507	0,016256274
18	0,7849	0,3692	0,4157	0,056364279
19	0,5034	0,6533	-0,1499	0,107680787
20	0,6391	0,3820	0,2571	0,006209632
21	0,9576	0,4562	0,5014	0,104400199
22	0,9410	1,4946	-0,5536	0,535570001
23	0,6622	0,5973	0,0649	0,012841014
24	0,9208	0,5148	0,4060	0,05188273
25	0,8984	0,4283	0,4701	0,085184263

$$\bar{Z}_{(25)} = \frac{\sum_{j=1}^{25} Z_j}{25} = 0,18$$

$$t_{24;0,975} = 2,064$$

$$\widehat{Var}(\bar{Z}_{(25)}) = \frac{\sum_{j=1}^{25} (Z_j - \bar{Z}_{(25)})^2}{24} = 0,121533789$$

$$BI: \bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1;1-\frac{\alpha}{2}} * \sqrt{\frac{\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)})}{n}} = 0,18 \pm 2,064 * \sqrt{\frac{0,121533789}{25}} = [0,03 ; 0,33]$$

**Bijlage 35: Ham stroomafwaarts**

Replicatie	$X_{0j}$	$X_{1j}$	$Z_j$	$Z_j - \bar{Z}_{(25)}$
1	0,6700	0,2819	0,3881	0,051116514
2	0,6383	0,4072	0,2311	0,004773201
3	0,7392	0,4817	0,2575	0,009120705
4	0,8393	0,5247	0,3147	0,023306872
5	0,5611	0,3822	0,1789	0,00028598
6	0,5410	0,6483	-0,1073	0,07250272
7	0,5489	0,2746	0,2743	0,012621002
8	0,7870	0,4511	0,3359	0,030236791
9	0,7888	0,4268	0,3620	0,039989853
10	0,6522	0,5127	0,1395	0,000506301
11	0,7496	0,4232	0,3264	0,027021463
12	0,5214	0,3227	0,1986	0,001342778
13	0,5507	0,4119	0,1389	0,000535707
14	0,8089	0,4538	0,3552	0,037317046
15	0,5201	0,4093	0,1107	0,002626925
16	0,5883	0,5279	0,0604	0,010331306
17	0,4087	0,5428	-0,1340	0,087633291
18	0,6665	0,4058	0,2607	0,009739775
19	0,7016	0,9449	-0,2433	0,164268544
20	0,6374	0,4102	0,2272	0,004253341
21	0,9100	0,4521	0,4579	0,087577287
22	0,5894	1,5778	-0,9884	1,323307902
23	0,6228	0,4570	0,1658	1,46129E-05
24	0,8128	0,3768	0,4360	0,075059607
25	0,5947	0,2915	0,3032	0,019933903

$$\bar{Z}_{(25)} = \frac{\sum_{j=1}^{25} Z_j}{25} = 0,16$$

$$t_{24;0,975} = 2,064$$

$$\widehat{Var}(\bar{Z}_{(25)}) = \frac{\sum_{j=1}^{25} (Z_j - \bar{Z}_{(25)})^2}{24} = 0,087309309$$

$$BI: \bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1;1-\frac{\alpha}{2}} * \sqrt{\frac{\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)})}{n}} = 0,16 \pm 2,064 * \sqrt{\frac{0,087309309}{25}} = [0,04 ; 0,29]$$

**Bijlage 36: Olen stroomafwaarts**

Replicatie	$X_{0j}$	$X_{1j}$	$Z_j$	$Z_j - \bar{Z}_{(25)}$
1	0,5826	0,3772	0,2055	0,002249566
2	0,4487	0,4181	0,0306	0,016239151
3	0,5145	0,6400	-0,1255	0,080384898
4	0,6891	0,5673	0,1218	0,001313572
5	0,5305	0,5627	-0,0322	0,036177041
6	0,5791	0,5396	0,0394	0,014067858
7	0,5827	0,3521	0,2305	0,005254851
8	0,7465	0,4860	0,2606	0,010506366
9	0,5685	0,5392	0,0293	0,016589082
10	0,7981	0,4216	0,3765	0,047699945
11	0,8142	0,5303	0,2840	0,015857641
12	0,7645	0,4144	0,3501	0,036880836
13	0,6573	0,3290	0,3283	0,028991144
14	0,5913	0,9807	-0,3894	0,2996803
15	0,5544	0,4843	0,0701	0,007738096
16	0,7910	0,4717	0,3193	0,026003356
17	0,6872	0,3977	0,2895	0,017278091
18	0,5960	0,3835	0,2124	0,002955441
19	0,8416	0,6034	0,2383	0,006432269
20	0,6429	0,4154	0,2275	0,004824456
21	0,6527	0,8148	-0,1621	0,102488344
22	1,0778	0,4923	0,5855	0,182699613
23	0,6558	0,4668	0,1890	0,0009579
24	0,6449	0,8008	-0,1560	0,098598603
25	0,8622	0,4339	0,4282	0,072994704

$$\bar{Z}_{(25)} = \frac{\sum_{j=1}^{25} Z_j}{25} = 0,16$$

$$t_{24;0,975} = 2,064$$

$$\widehat{Var}(\bar{Z}_{(25)}) = \frac{\sum_{j=1}^{25} (Z_j - \bar{Z}_{(25)})^2}{24} = 0,047285963$$

$$BI: \bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1;1-\frac{\alpha}{2}} * \sqrt{\frac{\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)})}{n}} = 0,16 \pm 2,064 * \sqrt{\frac{0,047285963}{25}} = [0,07 ; 0,25]$$

**Bijlage 37: Winegem stroomafwaarts**

Replicatie	$X_{0j}$	$X_{1j}$	$Z_j$	$Z_j - \bar{Z}_{(25)}$
1	0,6967	0,2819	0,4147	0,049504797
2	0,3668	0,4072	-0,0404	0,054138832
3	1,0112	0,4817	0,5295	0,113731172
4	0,7012	0,5247	0,1766	0,000245408
5	0,6644	0,3822	0,2822	0,008099045
6	0,8015	0,6483	0,1532	0,001522035
7	0,4509	0,2746	0,1763	0,000254598
8	0,5346	0,4511	0,0835	0,011815211
9	0,6161	0,4268	0,1893	8,78723E-06
10	0,5619	0,5127	0,0492	0,020454896
11	1,0388	0,4232	0,6156	0,179235752
12	0,7777	0,3227	0,4549	0,068999057
13	0,6870	0,4119	0,2751	0,006867506
14	0,7862	0,4538	0,3324	0,019657659
15	0,6055	0,4093	0,1962	1,54597E-05
16	0,7868	0,5279	0,2589	0,00443939
17	0,7063	0,5428	0,1635	0,000823841
18	0,6840	0,4058	0,2782	0,007396554
19	0,7414	0,9449	-0,2035	0,156615508
20	0,6082	0,4102	0,1980	3,32401E-05
21	0,5809	0,4521	0,1289	0,004013987
22	0,8911	1,5778	-0,6867	0,772445249
23	0,6248	0,4570	0,1678	0,000598446
24	0,8337	0,3768	0,4569	0,070036809
25	0,4471	0,2915	0,1556	0,001344604

$$\bar{Z}_{(25)} = \frac{\sum_{j=1}^{25} Z_j}{25} = 0,19$$

$$t_{24;0,975} = 2,064$$

$$\widehat{Var}(\bar{Z}_{(25)}) = \frac{\sum_{j=1}^{25} (Z_j - \bar{Z}_{(25)})^2}{24} = 0,064679077$$

$$BI: \bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1;1-\frac{\alpha}{2}} * \sqrt{\frac{\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)})}{n}} = 0,19 \pm 2,064 * \sqrt{\frac{0,064679077}{25}} = [0,09; 0,30]$$

**Bijlage 38: Wijnegem stroomopwaarts**

Replicatie	$X_{0j}$	$X_{1j}$	$Z_j$	$Z_j - \bar{Z}_{(25)}$
1	3,1503	1,0853	2,0650	1,333376442
2	1,6943	0,8945	0,7999	0,012191944
3	1,9513	1,2293	0,7220	0,035449658
4	1,5963	1,1076	0,4888	0,177687145
5	1,9110	1,1953	0,7157	0,037874659
6	1,9173	0,9443	0,9730	0,003931773
7	2,0809	1,0787	1,0021	0,008436541
8	1,5803	1,0908	0,4895	0,177063957
9	2,0620	2,1260	-0,0640	0,949223068
10	2,9930	1,9367	1,0563	0,021332391
11	1,9980	0,9663	1,0317	0,01473453
12	1,9850	1,4467	0,5383	0,138345717
13	2,4538	0,7573	1,6965	0,618139094
14	1,6917	1,1590	0,5327	0,142559002
15	1,9493	1,5050	0,4443	0,217107037
16	2,4830	1,1759	1,3071	0,157480045
17	2,2223	0,8253	1,3970	0,236930632
18	3,5103	0,8603	2,6500	3,026622912
19	1,6663	1,0546	0,6117	0,089121291
20	2,5670	1,1235	1,4435	0,284274172
21	2,2310	1,3013	0,9297	0,000375556
22	2,4451	1,3840	1,0611	0,022734053
23	2,1310	1,1333	0,9977	0,007636291
24	1,8073	1,4903	0,3170	0,351982102
25	1,0610	1,5105	-0,4495	1,848980528

$$\bar{Z}_{(25)} = \frac{\sum_{j=1}^{25} Z_j}{25} = 0,91$$

$$t_{24;0,975} = 2,064$$

$$\widehat{Var}(\bar{Z}_{(25)}) = \frac{\sum_{j=1}^{25} (Z_j - \bar{Z}_{(25)})^2}{24} = 0,413066272$$

$$BI: \bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1;1-\frac{\alpha}{2}} * \sqrt{\frac{\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)})}{n}} = 0,91 \pm 2,064 * \sqrt{\frac{0,413066272}{25}} = [0,64 ; 1,18]$$

**Bijlage 39: Olen stroomopwaarts**

Replicatie	$X_{0j}$	$X_{1j}$	$Z_j$	$Z_j - \bar{Z}_{(25)}$
1	1,7161	1,0704	0,6457	2,14464E-05
2	2,0374	0,9936	1,0438	0,154780595
3	1,7980	2,0012	-0,2032	0,728588776
4	1,5564	1,5207	0,0357	0,377751821
5	2,4968	2,0243	0,4725	0,031619837
6	1,2362	0,9233	0,3129	0,113876194
7	2,2938	0,8859	1,4079	0,573910678
8	1,7675	1,4406	0,3269	0,104615723
9	1,5471	1,1562	0,3908	0,067337178
10	2,6636	1,4737	1,1899	0,291143902
11	3,5537	2,2917	1,2620	0,374192058
12	2,3053	1,1331	1,1721	0,27228858
13	1,4620	1,4130	0,0490	0,361648451
14	2,3995	0,9731	1,4264	0,602278928
15	3,0992	1,2687	1,8305	1,392832978
16	2,7199	1,2145	1,5054	0,731211569
17	2,0553	1,2490	0,8062	0,024296316
18	1,7887	0,9406	0,8481	0,039092497
19	1,5216	0,9643	0,5573	0,008651447
20	1,1601	1,6067	-0,4466	1,203261444
21	1,9242	1,4051	0,5191	0,017225816
22	2,1561	1,5536	0,6025	0,002285304
23	1,9687	1,7081	0,2606	0,151879759
24	2,0460	1,3279	0,7181	0,004593568
25	2,3378	2,8131	-0,4754	1,267196706

$$\bar{Z}_{(25)} = \frac{\sum_{j=1}^{25} Z_j}{25} = 0,65$$

$$t_{24;0,975} = 2,064$$

$$\widehat{Var}(\bar{Z}_{(25)}) = \frac{\sum_{j=1}^{25} (Z_j - \bar{Z}_{(25)})^2}{24} = 0,370690899$$

$$BI: \bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1;1-\frac{\alpha}{2}} * \sqrt{\frac{\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)})}{n}} = 0,65 \pm 2,064 * \sqrt{\frac{0,413066272}{25}} = [0,39 ; 0,91]$$



**Bijlage 40: Ham stroomopwaarts**

Replicatie	$X_{0j}$	$X_{1j}$	$Z_j$	$Z_j - \bar{Z}_{(25)}$
1	1,3825	1,0433	0,3392	0,035526118
2	1,9772	0,7788	1,1984	0,449895046
3	1,8146	3,4062	-1,5916	4,491255943
4	1,8472	4,3561	-2,5089	9,22058936
5	2,5802	1,9940	0,5862	0,003424155
6	1,4771	1,0976	0,3796	0,021928817
7	1,5183	0,9258	0,5925	0,004203496
8	3,0348	1,1184	1,9164	1,928661562
9	1,6144	1,0373	0,5771	0,002450555
10	2,4733	0,9447	1,5286	1,001962695
11	2,1243	0,7170	1,4072	0,773681582
12	2,0081	1,0890	0,9191	0,153208377
13	1,6485	0,8908	0,7577	0,052908603
14	2,9895	0,7193	2,2701	3,036224293
15	3,1047	2,8741	0,2305	0,088266762
16	1,3496	4,0906	-2,7410	10,68429431
17	1,4402	0,8842	0,5561	0,000808723
18	1,5463	2,9308	-1,3845	3,65630707
19	1,5452	0,8515	0,6937	0,02758552
20	2,1643	1,3495	0,8149	0,082497077
21	2,2203	1,0151	1,2052	0,459121024
22	2,3421	1,0823	1,2598	0,536044042
23	2,7851	0,9376	1,8474	1,741879946
24	2,0826	0,8675	1,2152	0,472673799
25	2,5327	1,4104	1,1223	0,353610018

$\bar{Z}_{(25)} = \frac{\sum_{j=1}^{25} Z_j}{25} = 0,53$   
 $t_{24;0,975} = 2,064$   
 $\widehat{var}(\bar{Z}_{(25)}) = \frac{\sum_{j=1}^{25} (Z_j - \bar{Z}_{(25)})^2}{24} = 1,636625371$   
 BI:  $\bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1;1-\frac{\alpha}{2}} * \sqrt{\frac{\widehat{var}(\bar{Z}_{(n)})}{n}} = 0,53 \pm 2,064 * \sqrt{\frac{1,636625371}{25}} = [-0,01 ; 1,07]$

**Bijlage 41: Ham stroomafwaarts**

Replicatie	$X_{0j}$	$X_{1j}$	$Z_j$	$Z_j - \bar{Z}_{(25)}$
1	1,9089	0,5270	1,3819	0,567313345
2	2,0175	0,5757	1,4418	0,661162523
3	2,2250	2,4633	-0,2383	0,751680494
4	2,8292	4,2608	-1,4317	4,245203144
5	2,0434	2,3876	-0,3442	0,946610882
6	1,5620	0,8373	0,7247	0,009214236
7	1,3899	1,4730	-0,0831	0,50658883
8	3,7953	1,2484	2,5469	3,67945887
9	2,0357	0,8405	1,1952	0,320954661
10	1,9265	1,2563	0,6702	0,00172665
11	2,1931	0,8991	1,2941	0,442761229
12	1,6610	0,7557	0,9053	0,076525189
13	1,3512	0,7284	0,6228	3,43294E-05
14	2,6940	1,0216	1,6724	1,089416381
15	3,1125	3,3607	-0,2483	0,769060707
16	1,8952	3,7811	-1,8858	6,322904283
17	1,4370	1,0270	0,4100	0,04782512
18	1,9413	2,8903	-0,9489	2,488791244
19	1,8910	0,9204	0,9706	0,116913846
20	2,6342	0,6659	1,9682	1,794406588
21	1,9470	1,0510	0,8960	0,071456965
22	2,0236	0,9654	1,0581	0,184427734
23	1,7010	1,1595	0,5415	0,007609287
24	2,6116	0,8026	1,8091	1,393252813
25	1,6490	0,8603	0,7887	0,025588923

$$\bar{Z}_{(25)} = \frac{\sum_{j=1}^{25} Z_j}{25} = 0,63$$

$$t_{24;0,975} = 2,064$$

$$\widehat{Var}(\bar{Z}_{(25)}) = \frac{\sum_{j=1}^{25} (Z_j - \bar{Z}_{(25)})^2}{24} = 1,105037011$$

$$BI: \bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1;1-\frac{\alpha}{2}} * \sqrt{\frac{\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)})}{n}} = 0,63 \pm 2,064 * \sqrt{\frac{1,105037011}{25}} = [0,19; 1,07]$$

**Bijlage 42: Olen stroomafwaarts**

Replicatie	$X_{0j}$	$X_{1j}$	$Z_j$	$Z_j - \bar{Z}_{(25)}$
1	2,1953	1,1730	1,0224	0,25814863
2	1,4534	0,9524	0,5010	0,000176966
3	1,4930	1,0191	0,4739	0,00163388
4	1,6412	1,3028	0,3384	0,030940629
5	2,5267	1,4759	1,0508	0,287856383
6	1,6330	1,1743	0,4586	0,003098199
7	1,4698	1,6877	-0,2180	0,536192375
8	1,4714	1,0490	0,4224	0,008450635
9	1,4930	1,1239	0,3691	0,021092026
10	2,2227	1,7718	0,4508	0,004026526
11	2,0686	2,7119	-0,6433	1,339958508
12	2,1095	0,7749	1,3346	0,672878667
13	1,6947	1,3355	0,3592	0,024064386
14	1,2039	1,3166	-0,1127	0,393087913
15	1,9147	1,6617	0,2529	0,06831584
16	2,3571	1,4632	0,8939	0,144066599
17	2,0249	1,0445	0,9803	0,217199086
18	1,3869	1,0087	0,3782	0,01852399
19	2,1378	0,9633	1,1745	0,435904575
20	1,7332	1,0613	0,6719	0,024823021
21	1,5102	1,4070	0,1032	0,168965272
22	2,1169	0,9976	1,1193	0,366036252
23	2,0705	1,0201	1,0504	0,287441852
24	1,6019	1,1455	0,4564	0,0033576
25	2,7780	2,8089	-0,0308	0,297188273

$$\bar{Z}_{(25)} = \frac{\sum_{j=1}^{25} Z_j}{25} = 0,52$$

$$t_{24;0,975} = 2,064$$

$$\widehat{Var}(\bar{Z}_{(25)}) = \frac{\sum_{j=1}^{25} (Z_j - \bar{Z}_{(25)})^2}{24} = 0,233892837$$

$$BI: \bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1;1-\frac{\alpha}{2}} * \sqrt{\frac{\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)})}{n}} = 0,52 \pm 2,064 * \sqrt{\frac{0,233892837}{25}} = [0,31 ; 0,72]$$

**Bijlage 43: Winegem stroomafwaarts**

Replicatie	$X_{0j}$	$X_{1j}$	$Z_j$	$Z_j - \bar{Z}_{(25)}$
1	2,3839	0,5339	1,8499	1,10048125
2	0,9558	0,8401	0,1157	0,469487343
3	2,2284	1,1300	1,0985	0,088550741
4	1,5152	1,1392	0,3760	0,180568509
5	1,7947	0,8590	0,9357	0,018173034
6	2,7627	1,3490	1,4136	0,375461418
7	1,5675	1,1139	0,4536	0,120590634
8	1,4102	0,7368	0,6734	0,016262681
9	1,7351	0,9963	0,7388	0,003854017
10	1,2496	0,9230	0,3266	0,224957057
11	2,7670	0,9955	1,7715	0,942156974
12	1,9205	0,7067	1,2139	0,170539929
13	2,1851	1,1654	1,0197	0,047875887
14	1,6272	0,7525	0,8747	0,005448607
15	1,5384	0,8617	0,6767	0,015428252
16	2,0581	1,0714	0,9867	0,034516985
17	1,6626	1,0975	0,5650	0,055631549
18	2,1526	1,0930	1,0597	0,06695894
19	1,6549	0,8250	0,8298	0,000836726
20	1,5061	0,8996	0,6066	0,037758463
21	1,6134	1,2295	0,3840	0,173841143
22	2,2773	1,0641	1,2132	0,169998874
23	1,5602	0,9133	0,6470	0,023689356
24	2,1332	1,1399	0,9934	0,037045775
25	1,0284	1,8297	-0,8012	2,566813707

$$\bar{Z}_{(25)} = \frac{\sum_{j=1}^{25} Z_j}{25} = 0,80$$

$$t_{24;0,975} = 2,064$$

$$\widehat{Var}(\bar{Z}_{(25)}) = \frac{\sum_{j=1}^{25} (Z_j - \bar{Z}_{(25)})^2}{24} = 0,289455237$$

$$BI: \bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1;1-\frac{\alpha}{2}} * \sqrt{\frac{\widehat{Var}(\bar{Z}_{(n)})}{n}} = 0,80 \pm 2,064 * \sqrt{\frac{0,289455237}{25}} = [0,57 ; 1,03]$$

## Auteursrechtelijke overeenkomst

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

**Modelleren van wachttijden aan opeenvolgende sluizen**

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

Jaar: **2014**

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,

**Segers, Joris**

Datum: **31/05/2014**