

2015•2016
FACULTEIT BEDRIJFSECONOMISCHE WETENSCHAPPEN
*master in de toegepaste economische wetenschappen:
handelsingenieur*

Masterproef
Distributieplanning en voorraadbeheer voor het transport van olieproducten
via een pijplijn

Promotor :
Prof. dr. Gerrit JANSSENS

Simon Mechelmans
*Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de toegepaste economische
wetenschappen: handelsingenieur*

2015•2016

FACULTEIT BEDRIJFSECONOMISCHE
WETENSCHAPPEN

*master in de toegepaste economische wetenschappen:
handelsingenieur*

Masterproef

Distributieplanning en voorraadbeheer voor het transport
van olieproducten via een pijplijn

Promotor :
Prof. dr. Gerrit JANSSENS

Simon Mechelmans

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

WOORD VOORAF

Deze masterproef vormt het sluitstuk van mijn tweejarige masteropleiding 'Handelsingenieur', met hoofdafstudeerrichting 'Operationeel Management en Logistiek,' aan de Universiteit van Hasselt. Het onderwerp van de masterproef 'Distributieplanning en voorraadbeheer voor het transport van olieproducten via een pijplijn' sprak me aan omdat olieproducten alomtegenwoordig zijn in de huidige maatschappij.

Graag wil ik een bijzonder woord van dank richten aan mijn promotor Prof. dr. Gerrit Janssens voor zijn waardevolle begeleiding en enthousiasme, en dan vooral bij de praktijkstudie. Deze praktijkstudie was niet altijd even gemakkelijk aangezien er programmeertaal voor het optimalisatieprogramma 'LINGO' geschreven moest worden. Ikzelf had tijdens mijn studies wel al eens met dit optimalisatieprogramma gewerkt, maar ik was er helemaal nog niet vertrouwd mee.

Daarnaast wil ik Prof. dr. ir. Susana Relvas bedanken voor het beantwoorden van mijn vragen via e-mail. Prof. Relvas is de hoofdauteur van het artikel waarop mijn praktijkstudie gebaseerd is.

Ik ben tevreden over het resultaat omdat de literatuurstudie leerrijk kan zijn voor personen die niets van het onderwerp afweten en de praktijkstudie nuttig kan zijn voor personen die wel vertrouwd zijn met dit onderwerp.

Simon Mechelmans

Lummen, 1 juni 2016

SAMENVATTING

Wereldwijd worden er 37,7 miljoen vaten aardolie en 15,8 miljoen vaten olieproducten per dag geïmporteerd en geëxporteerd. Eenzelfde hoeveelheid wordt daarnaast ook nog eens binnen de landsgrenzen zelf verhandeld. Gegeven deze gigantische hoeveelheden speelt de olie-industrie een zeer belangrijke rol in de hedendaagse economie en is het voor verschillende stakeholders voornamelijk dat de werking van de 'Petroleum Supply Chain' zo efficiënt mogelijk verloopt. Aangezien vooral de operationele kosten van het transport en het voorraadbeheer van olieproducten een grote impact heeft op de finale prijs is het zeer belangrijk dat deze activiteiten zo efficiënt mogelijk worden georganiseerd.

Tientallen jaren geleden werd gestart met het oplossen van deze complexe problemen met behulp van eenvoudige spreadsheets en op basis van heuristische methodes en eerdere ervaringen. Echter was deze wijze van werken na verloop van tijd achterhaald omdat ze vaak niet tot de optimale oplossing leidde en ze bovendien zeer tijdsintensief was. Omwille van die reden zijn grote oliebedrijven een tien à vijftien jaren geleden begonnen met het investeren in de ontwikkeling van optimalisatieprogramma's die betere resultaten in een korte tijd kunnen opleveren.

Optimalisatie is een interdisciplinair vakgebied waarin wiskunde en computerwetenschap elkaar ontmoeten. Er wordt in de literatuur voornamelijk gebruik gemaakt van Mixed Integer Linear Programming (MILP) om deze complexe problemen van het type ter studie op te lossen. Deze masterproef bespreekt het transport van verschillende olieproducten vanuit één olieraffinaderij via een multi-product pijplijn naar één distributiecentrum dat beschikt over verschillende opslagtanks. Daarnaast wordt dit gecombineerd met het voorraadbeheer van deze olieproducten in het distributiecentrum.

Aangezien Relvas et al. (2006) het eerste artikel omtrent de combinatie van deze twee activiteiten publiceerden, wordt hun artikel gebruikt als een houvast voor de uitwerking van de praktijkstudie van deze masterproef. De wiskundige beperkingen uit het artikel van Relvas et al. (2006) werden in detail bestudeerd. In tegenstelling tot Relvas et al. (2006), die gebruik maakten van het optimalisatieprogramma 'GAMS', wordt in deze masterproef het optimalisatieprogramma 'LINGO' gebruikt.

Een selectie van beperkingen werd gedaan en er werd in deze masterproef een model in LINGO ontwikkeld dat er in slaagde om een schedule te berekenen dat rekening hield met bepaalde restricties zoals onder andere types van olieproducten die niet achter elkaar mogen gepompt worden. Er werd een model ontwikkeld voor zes loten, drie olieproducten en een tijdshorizon van zeven dagen. Vervolgens werd ook een model ontwikkeld voor tien loten, drie olieproducten en een tijdshorizon van 14 dagen.

LINGO berekende voor de beide modellen verschillende schedules. Aan de hand van een manuele calculatie van de voorraad, die gebaseerd is op een discrete dagelijkse klantenvraag, kan beslist worden welke schedule er gekozen wordt. Er werd eveneens getracht om een berekening van de voorraad, die gebaseerd is op een continue klantenvraag, in LINGO te programmeren. Deze tweede berekening van de voorraad werkt echter niet helemaal correct. De achterliggende ideeën worden wel besproken opdat deze berekening van de voorraad in de toekomst eventueel nog geperfectioneerd kan worden.

Inhoudsopgave

HOOFDSTUK 1: PROBLEEMSTELLING	1
1.1 Inleiding	1
1.2 Opzet van de masterproef	2
HOOFDSTUK 2: LITERATUURSTUDIE	5
2.1 De Petroleum Supply Chain	5
2.1.1 Inleiding	5
2.1.2 Wat is aardolie?.....	6
2.1.3 Wat zijn olieproducten?	7
2.1.4 Upstream van de Petroleum Supply Chain.....	8
2.1.5 Midstream van de Petroleum Supply Chain.....	8
2.1.6 Downstream van de Petroleum Supply Chain.....	10
2.1.7 Pijplijnen	14
2.1.8 Actuele cijfers uit de olie-industrie	16
2.2 Transport en opslag van olieproducten	18
2.2.1 Voorbereiden van een schedule.....	18
2.2.2 Uitvoeren van een schedule	19
2.2.3 Minimalisatie van de operationele kosten.....	19
2.2.4 Continue of discrete wiskundige programmeringsmodellen	19
2.2.5 Assumpties en vereiste data bij de opmaak van een schedule.....	21
2.2.6 Overzicht van publicaties omtrent scheduling van olieproducten	22
HOOFDSTUK 3: PRAKTIJKSTUDIE	29
3.1 Vereiste wiskundige beperkingen om een schedule op te stellen	29
3.1.1 Nomenclature.....	29
3.1.2 Basismodel.....	31
3.2 Ontwikkeling model in LINGO	41
3.2.1 Gemaakte assumpties	41
3.2.2 Bespreking input.....	44
3.2.3 Bespreking resultaten.....	52
3.2.4 Verandering doelfunctie.....	66
HOOFDSTUK 4: CONCLUSIE	69
HOOFDSTUK 5: LIJST VAN GERAADPLEEGDE WERKEN	71
HOOFDSTUK 6: BIJLAGEN	75
6.1 Model LINGO	75
6.2 Output LINGO: voorbeeld 1	78

HOOFDSTUK 1: PROBLEEMSTELLING

1.1 Inleiding

De wereldwijde consumptie van olieproducten in 2012 bedroeg maar liefst 89,2 miljoen vaten¹ per dag. Daarnaast worden er 37,3 miljoen vaten aardolie en 15,8 miljoen vaten olieproducten per dag geïmporteerd en geëxporteerd. Eenzelfde hoeveelheid wordt bovendien ook nog eens verhandeld binnen de landsgrenzen zelf (De Souza Filho, Bahiense, Ferreira Filho, 2013). Gegeven deze gigantische hoeveelheden speelt de olie-industrie een zeer belangrijke rol in de hedendaagse economie en is het voor alle stakeholders voornamelijk dat de werking van de 'Petroleum Supply Chain' zo efficiënt mogelijk verloopt (Magatão, Arruda, & Neves-Jr, 2005). Een efficiënte werking van de Petroleum Supply Chain is zeer belangrijk aangezien deze mede verantwoordelijk is voor de finale prijs van olieproducten. Een substantieel deel van die finale prijs van olieproducten wordt bepaald door de logistieke kosten. Onder de logistieke kosten vallen voornamelijk de transportkosten en de opslagkosten van olieproducten. Omwille van die reden is het primaire doel van oliebedrijven om het transport van olieproducten, dat voornamelijk via pijplijnen verloopt, en de opslag van deze olieproducten, zo te organiseren dat de operationele kosten zo laag mogelijk zijn (De Souza Filho et al., 2013).

Door de grote vraag naar olieproducten, die bovendien nog steeds toeneemt (Rejowski & Pinto, 2008) en een steeds competitiever wordende oliemarkt (Más & Pinto, 2003) hebben verschillende oliebedrijven een tien à vijftien jaren geleden besloten om specifieke optimalisatieprogramma's te ontwikkelen die helpen bij het nemen van belangrijke operationele en economische beslissingen. Zo werden er optimalisatieprogramma's ontwikkeld die het transport van olieproducten via pijplijnen efficiënter maakte (Rejowski & Pinto, 2008). Belangrijk in deze context is het gegeven dat het transport van olieproducten nog vaak geldt als een bottleneck in de Petroleum Supply Chain (Más & Pinto, 2003) en één van de meest uitdagende en complexe problemen in de Petroleum Supply Chain is (MirHassani & BeheshtiAsl, 2013)

Optimalisatie

Door het gebruik van optimalisatieprogramma's kunnen er significant lagere kosten van transport en opslag behaald worden en zorgen ze daarnaast ook voor een grotere klanttevredenheid. De klanttevredenheid neemt toe dankzij de mogelijkheid van de olieraffinaderijen om betere schedules² op te stellen (Rejowski & Pinto, 2008). Dat is zeer gewenst want vertragingen zorgen immers voor verloren tijd en tekort aan olieproducten in de distributiecentra. Leveringen die te vroeg plaatsvinden daarentegen zorgen dan weer voor een te hoge voorraadkost bij de ontvanger (Más & Pinto, 2003).

¹ Eén vat olie bevat 159 liter.

² Bevat onder andere de volgorde waarin de loten elkaar opvolgen, de groottes van de loten, het tijdstip waarop de loten in de pijplijn moeten worden geïnjecteerd, enzovoort.

Complexe transport- en opslagproblemen oplossen zijn inherent aan de downstream³ van de Petroleum Supply Chain. Tientallen jaren geleden gebeurde dit op basis van eerdere ervaringen en heuristische methodes (MirHassani & BeheshtiAsl, 2013). Deze werkwijze maakte gebruik van eenvoudige spreadsheets en manuele calculaties. Dit vereiste verscheidene herhalingen en was daardoor zeer tijdsintensief en eigenlijk achterhaald. Vandaag de dag zijn er verschillende optimalisatieprogramma's beschikbaar om de scheduling van olieproducten efficiënter uit te voeren (Cafaro, Cafaro, Méndez, & Cerdá, 2015).

Optimalisatie is een interdisciplinair vakgebied waarin wiskunde en computerwetenschap elkaar ontmoeten en draagt bij tot zeer betrouwbare resultaten. Complexe problemen kunnen zeer snel opgelost worden (MirHassani & BeheshtiAsl, 2013). Ondanks de beschikbare optimalisatieprogramma's voor de scheduling van olieproducten wordt hiervan in de realiteit nog niet altijd gebruik gemaakt (Cafaro et al., 2015).

De gebruikte optimalisatietechniek voor het opstellen van een schedule maakt gebruik van een MILP⁴ model en/of een MINLP⁵ model al dan niet in combinatie met een heuristische methode. Deze MILP of MINLP modellen passen een continue of een discrete tijdsrepresentatie toe. Ook voor de opdeling van de pijplijn kan de continue of discrete volumerepresentatie toegepast worden (Cafaro et al., 2015).

1.2 Opzet van de masterproef

In de beschikbare literatuur werd tot nu toe veel aandacht besteed aan de upstream, de midstream en een specifiek deel van de downstream, namelijk de verschillende raffinageprocessen. Over dat andere belangrijke deel van de downstream, namelijk het transport van olieproducten naar een distributiecentrum en de opslag ervan, werd minder gepubliceerd. Wat echter tot in het jaar 2006 nog nooit besproken werd, was de combinatie van het transport van olieproducten via een pijplijn naar en het voorraadbeheer van deze olieproducten in het distributiecentrum. Deze leemte in de literatuur werd opgevuld door het pionierswerk van Relvas et al. in 2006.

In de praktijkstudie van deze masterproef is een selectie gemaakt van de vele wiskundige beperkingen die Relvas et al. (2006) publiceerden en toepasten in het optimalisatieprogramma 'GAMS'⁶. Deze masterproef is vernieuwend in dat opzicht dat er gebruik gemaakt zal worden van het optimalisatieprogramma 'LINGO'⁷ om de scheduling en voorraadbeheer van olieproducten in kaart te

³ De downstream is het laatste deel van de Petroleum Supply Chain. Deze volgt na de midstream en de upstream en bevat de raffinageprocessen, het transport van de olieproducten vanuit een olieraffinaderij naar een distributiecentrum, de opslag van deze olieproducten en de distributie naar de eindklant toe.

⁴ Mixed Integer Linear Programming

⁵ Mixed Integer Non Linear Programming

⁶ General Algebraic Modeling System. Een computerprogramma dat kan gebruikt worden voor wiskundige programmering en optimalisatie.

⁷ Optimalisatie software voor lineaire, niet-lineaire en integere programmering

brengen. Op basis van de verkregen resultaten worden conclusies getrokken omtrent de mogelijkheden en beperkingen van de gebruikte optimalisatiemethode.

Het pionierswerk van Relvas et al. (2006) leidt dus tot de centrale onderzoeksvraag van deze masterproef:

“Hoe kan de scheduling van het transport van olieproducten vanuit een olieraffinaderij via een multi-product pijplijn naar een distributiecentrum en het voorraadbeheer in het distributiecentrum gemodelleerd worden?”

Ten einde deze centrale onderzoeksvraag te beantwoorden, worden volgende deelvragen geformuleerd:

- 1) Hoe ziet een Petroleum Supply Chain eruit?
- 2) Hoe gebeurt het schedulen van het transport en de opslag van olieproducten in de praktijk?
- 3) Met welke wiskundige beperkingen moet rekening worden gehouden als input voor optimalisatieprogramma's?

HOOFDSTUK 2: LITERATUURSTUDIE

2.1 De Petroleum Supply Chain

Vooraleer dieper wordt ingegaan op dat specifiek deel van de Petroleum Supply Chain waarop deze masterproef focust, namelijk het transport van olieproducten naar en de opslag van deze olieproducten in het distributiecentrum, wordt eerst de volledige Petroleum Supply Chain bondig besproken.

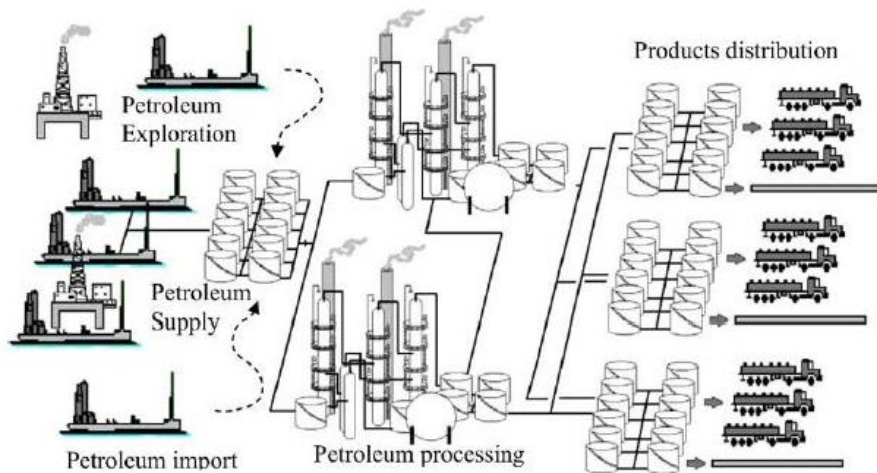
2.1.1 Inleiding

De olie-industrie is de grootste leverancier van energie ter wereld. In de Verenigde Staten is deze industrie goed voor 39% van het totale energieaanbod en 97% van het totale aanbod van olieproducten dat gebruikt wordt voor transport (Nikisha, Li, & Ierapetritou, 2011).

Een typische Petroleum Supply Chain bestaat uit een upstream, een midstream en een downstream (zie figuur 1). De upstream bestaat uit de exploratie en het winnen van aardolie aan de bron. Na de upstream volgt de midstream. Deze omvat het bestellen en aankopen van aardolie door de olieraffinaderij, het transport van deze aardolie naar de olieraffinaderij alsook de opslag van deze aardolie in de olieraffinaderij. Ten slotte is er de downstream. De downstream bestaat uit de raffinageprocessen en het opslaan van de verkregen olieproducten in opslagtanks waarover de olieraffinaderij beschikt. Het transport van deze olieproducten via een pijplijn naar een distributiecentrum en de opslag van deze olieproducten in het distributiecentrum is de volgende stap. Ten slotte is er nog de levering van de olieproducten vanuit het distributiecentrum, dat vaak gelegen is in strategische consumentenmarkten, aan particulieren (Nikisha et al., 2011).

De belangrijkste beslissingen waarover in een Petroleum Supply Chain worden opgedeeld in drie niveaus. Eerst is er het strategisch niveau. Dit niveau houdt in dat managers beslissingen nemen omtrent het ontwerp van de Petroleum Supply Chain. Het betreft beslissingen over de optimale olie-infrastructuur en gelden bijgevolg voor een lange termijn. Het tweede niveau is het tactische niveau in combinatie met het operationeel niveau. Het tactische niveau gaat over de planning, het operationeel niveau gaat over de scheduling. De planning gaat altijd vooraf aan de scheduling. Met de planning wordt besloten welke activiteiten of handelingen moeten plaatsgrijpen en op welke manier. Scheduling daarentegen is gedetailleerder en bepaalt wanneer, door wie en hoe deze activiteiten of handelingen precies uitgevoerd worden. Het derde niveau ten slotte is het opvolgen en het controleren van de activiteiten van de Petroleum Supply Chain (Nikisha et al., 2011).

Oliebedrijven kunnen actief zijn in de upstream, in de midstream, in de downstream of in combinaties van de drie niveaus. Leidende oliebedrijven vandaag de dag zijn Exxon Mobil, Royal Dutch Shell, British Petroleum, ConocoPhillips en Chevron. Oliebedrijven zijn actief in verschillende landen en bedienen consumenten wereldwijd (Nikisha et al., 2011).



Figuur 1: Overzicht Petroleum Supply Chain (Neiro & Pinto, 2004)

2.1.2 Wat is aardolie?

Vooraleer olieproducten kunnen worden geproduceerd, moet een grondstof worden aangeleverd die kan worden omgevormd naar olieproducten. Aardolie, ook wel ruwe olie of petroleum genoemd, is de grondstof die hiervoor gebruikt wordt. Aardolie werd miljoenen jaren geleden gevormd in ondergrondse reservoirs. Er kan geboord worden naar deze reservoirs in de oceaan of op land (Wanquier, 1995).

Aardolie is geen homogeen materiaal. Aardolie heeft unieke chemische en fysische karakteristieken die variëren naarmate zijn formatie. (Gary, Handwerk, & Kaiser, 2007). Deze formaties verschillen van oliebron tot oliebron en zelfs in dezelfde oliebron kunnen deze formaties verschillen van elkaar. (Wanquier, 1995). Vandaag de dag worden wereldwijd 150 soorten aardolie verhandeld en vele soorten zijn een mengsel van aardolie uit twee of meer oliebronnen (Gary et al., 2007). Er bestaan twee grote groepen van aardolie. Enerzijds is er de zoete aardolie. Deze bestaat uit maximaal 1,5% zwavel. Anderzijds is er de zure aardolie die bestaat uit meer dan 1,5% zwavel (Nnadili, 2006).

Aardolie wordt in de literatuur gedefinieerd als een extreem complex mengsel van voornamelijk koolwaterstofcomponenten aangevuld met een kleine hoeveelheid andere materialen zoals zuurstof, stikstof, zwavel, zout en metalen. (Gary et al., 2007). De chemische samenstelling varieert tussen de 83% en 87% koolstof, 11% en 16% waterstof, 0% en 7% zuurstof, 0% en 7% stikstof en 0% en 4% zwavel. De exacte samenstelling is afhankelijk van de oliebron die wordt aangeboord (Wanquier, 1995).

De API-dichtheid, het zwavelgehalte en het total acid number (tan) zijn de belangrijkste eigenschappen van aardolie. De API-dichtheid is de meting van de dichtheid van aardolie en wordt beschreven in graden API. Hoe hoger het API getal, hoe lichter de aardolie. Aardolie met een lage hoeveelheid koolstof, een hoge hoeveelheid waterstof en dus een hoog API neigen meestal naar een hogere opbrengst van benzine en lichtere olieproducten. Als tweede is er het zwavelgehalte. Zwavel

is een ongewenste onzuiverheid in aardolie omwille van de vervuiling die het veroorzaakt. Olieraffinaderijen verwerken het liefst aardolie met een zo laag mogelijk zwavelgehalte. De total acid number ten slotte is de meetmaat van aardolie voor potentiële corrosie. Het total acid number kwantificeert het aantal milligram potassium hydroxide (KOH) dat nodig is om één gram aardolie te neutraliseren. Aardolie met een total acid number groter dan één milligram KOH/gram wordt meestal beschouwd als corrosieve aardolie en wordt gelabeld als high-tan aardolie. Hoe groter dit getal, hoe lager de kwaliteit van de aardolie is. (Gary et al., 2007).

De gravitatie, het zwavelgehalte en de total acid number van aardolie hebben een belangrijke economische en technische impact op de raffinageprocessen. Zware, zure aardolie vereist meer gesofisticeerde raffinageprocessen om lichte, meer waardevolle olieproducten, zoals bijvoorbeeld benzine, te produceren en is dus bijgevolg duurder. Om kopers van zware, zure aardolie te lokken, geven verdelers van aardolie vaak aanzienlijke korting. Lichte, zoete aardolie is waardevoller voor olieraffinaderijen omdat het lichtere, hoger geprijsde olieproducten oplevert en bovendien goedkoper is om te verwerken (Gary et al., 2007).

2.1.3 Wat zijn olieproducten?

Aardolie in zijn natuurlijke staat heeft geen waarde voor de consument en moet dus altijd worden omgevormd naar olieproducten die de consument wel kan gebruiken (Gary et al., 2007). Olieproducten zijn na water de meest gebruikte verbruiksartikelen ter wereld (Nnadili, 2006).

Types van olieproducten

De verschillende types van olieproducten kunnen worden onderverdeeld in drie categorieën. De classificatie gebeurt op de wijze waarop aardolie wordt gescheiden en in fracties wordt verdeeld. De eerste categorie zijn de lichte destillaten zoals liquified petroleum gas (LPG), benzine en nafta. Nafta is een vloeistof die bijvoorbeeld wordt gebruikt in aanstekers. De tweede categorie zijn de middelzware destillaten zoals petroleum, kerosine en diesel. Petroleum wordt onder andere gebruikt in petroleumlampen en voor verwarming. Petroleum voor verwarming wordt tegenwoordig meer vervangen door aardgas. Ten slotte zijn er de zware destillaten en de residuen zoals stookolie, smeermiddel, paraffine, bitumen, teer en petroleum coke. Daarnaast komt er ook nog zwavel, alkenen, warmte en elektrische energie vrij, maar deze worden niet ingedeeld in een categorie. Daarnaast produceren olieraffinaderijen ook nog verschillende halffabricaten zoals waterstof en lichte koolwaterstoffen die ook niet worden ingedeeld in een categorie. Deze halffabricaten worden meestal niet getransporteerd maar worden gemengd of verder bewerkt in de olieraffinaderij (Leffler, 1985).

Zoals eerder al aangehaald zijn olieproducten goed voor een groot deel van het wereldwijde energieaanbod. Benzine, kerosine en diesel worden gebruikt voor brandstof van auto's, tractors, vrachtwagens, vliegtuigen en schepen. Stookolie wordt gebruikt om huizen en commerciële gebouwen te verwarmen alsook om elektriciteit te genereren. Andere olieproducten vormen basismaterialen voor het maken van synthetische vezels voor kledij. Verder worden ze gebruikt voor het produceren van plastic, verf, insecticiden, meststof, zepen en synthetisch rubber. (Speight, 2006).

2.1.4 Upstream van de Petroleum Supply Chain

Een Petroleum Supply Chain begint met de upstream. De upstream houdt de exploratie en het winnen van aardolie in. Het winnen van aardolie kan zowel in de oceaan of op land gebeuren. In de oceaan wordt gebruik gemaakt van boorplatformen, op het land daarentegen worden 'jaknikkers' gebruikt. Beide ontginningsmethodes maken gebruik van krachtige pompen om de aardolie uit de ondergrondse reservoirs te pompen (Neiro & Pinto, 2004).

De ontginning van aardolie wordt opgedeeld in drie stappen. De eerste stap is de *primary recovery method* en wordt toegepast tijdens het initiële aanboren van een oliebron. Er wordt slim gebruik gemaakt van het drukverschil dat in de ondergrondse reservoirs aanwezig is om de aardolie vlot boven te krijgen. Na verloop van tijd, als de druk te laag is om het pompen economische rendabel te houden of als de verhouding tussen water en olie te groot is geworden, treedt de *secondary oil recovery* in werking. Deze techniek steunt op het injecteren van bepaalde vloeistoffen met specifieke eigenschappen in de ondergrondse reservoirs waardoor de druk toeneemt en de aardolie bijgevolg gemakkelijker kan worden opgepompt. De *tertiary oil recovery* ten slotte verwijst naar een aantal gesofisticeerde technieken die vaak tegen het einde van de levensduur van een oliebron worden toegepast. De stromingseigenschappen van aardolie worden veranderd waardoor het oppompen van de aardolie makkelijker wordt. Deze techniek wordt ook wel de *enhanced oil recovery* genoemd (Tzimas, Georgakaki, Garcia-Cortes, & Peteves, 2005).

2.1.5 Midstream van de Petroleum Supply Chain

Vooraleer aardolie kan omgevormd worden naar olieproducten dient de aardolie eerst naar de olieraffinaderij getransporteerd te worden.

2.1.5.1 Aankoop van aardolie

De selectie en aankoop van aardolie door een olieraffinaderij is een zeer belangrijke stap aangezien deze directe invloed heeft op de kwaliteit van de geproduceerde olieproducten. Aardolieselectie en aankoop wordt periodiek gedaan op vaste of variabele tijdsintervallen en de aardolie wordt telkens aangekocht voor de volgende productiecycclus die kan variëren van enkele dagen tot een maand (Nikisha et al., 2011).

2.1.5.2 Transport van aardolie naar de olieraffinaderij

Transport van aardolie van een oliebron in de oceaan of van een haven naar de ontvangende haven

Voor het transport van aardolie die afkomstig is van een boorplatform of voor het transport van aardolie vanuit een bepaalde haven naar de specifieke haven die in verbinding staat met een olieraffinaderij via één of meerdere pijplijnen, wordt gebruik gemaakt van olietankers. Olietankers zijn gigantische zeeschepen die speciaal ontworpen zijn om aardolie te transporteren. Een olietanker bevat meestal verschillende opslagtanks waarmee meerdere types van aardolie, zonder risico op vermenging, kunnen worden vervoerd (Moro & Pinto, 2004).

Momenteel bestaan er zes types van olietankers die worden ingedeeld per categorie van capaciteit. Medium range olietankers bijvoorbeeld hebben een capaciteit van 25.000 DWT⁸ tot en met 50.000 DWT. Verder zijn er nog de Panamax, Aframax, Suezmax, VLCC⁹ en ULCC¹⁰. De grootste olietankers varen meestal van het Midden-Oosten en West-Afrika naar Azië. Deze olietankers kunnen 320.000 DWT of drie miljoen vaten aardolie per trip transporteren (The Robert S. Strauss Center, 2008). Meestal is de regel dat hoe groter de olietanker, hoe groter de afstanden die ze afleggen. Naast het gebruik van olietankers voor het transport van aardolie, worden olietankers in mindere mate ook gebruikt voor het transport van olieproducten (Hennig et al., 2012).

Voorts is het belangrijk om te weten dat havens vaak bepaalde restricties opleggen aan olietankers. Deze restricties gaan vooral over operationele beperkingen. Een voorbeeld hiervan is het maximum gewicht en volume waarover een olietanker mag beschikken als ze een bepaalde haven binnen- of buitenvaren (Hennig et al., 2012).

Transport van aardolie van de ontvangende haven naar de olieraffinaderij

Meestal krijgt een olieraffinaderij aardolie aangeleverd via een pijplijn die gelinkt is aan een haven waar olietankers aardolie lossen in speciaal ontworpen opslagtanks. Een olietanker lost de aardolie in een opslagtank maar een olietanker kan ook direct gekoppeld worden aan een pijplijn zodat de aardolie rechtstreeks vanuit de opslagtanks van de olietanker naar de olieraffinaderij gepompt kan worden (Moro & Pinto, 2004).

Transport van aardolie van een oliebron op land naar de olieraffinaderij

Ten slotte moet worden opgemerkt dat het ook kan voorvallen dat een oliebron op het land gelegen is die zich niet ver van de olieraffinaderij bevindt. De aardolie wordt in dat geval rechtstreeks via één of meerdere pijplijnen aangeleverd. Er wordt dan geen gebruik gemaakt van olietankers (Moro & Pinto, 2004).

2.1.5.3 Opslag aardolie in olieraffinaderij

Aardolie die in een olieraffinaderij aankomt, wordt opgeslagen in grote cilindrische opslagtanks die gebouwd zijn om tienduizenden kubieke meter aardolie op te slaan. Er is een bepaalde 'settling period'¹¹ nodig vooraleer deze aardolie gebruikt kan worden in de destillatietoren (Nikisha et al., 2011).

⁸ Deadweight tonnage is het draagvermogen van een schip en wordt meestal uitgedrukt in kubieke meter.

⁹ Very Large Crude Carrier

¹⁰ Ultra Large Crude Carrier

¹¹ De tijd die nodig is om de pekel die met aardolie een emulsie vormt, naar de bodem van de opslagtank te laten zakken.

2.1.6 Downstream van de Petroleum Supply Chain

De eerste stap van de downstream bestaat uit de omvorming van aardolie door raffinageprocessen naar olieproducten. Hierna volgt de distributie naar en opslag van deze olieproducten in het distributiecentrum. Ten slotte is er de levering aan klanten voornamelijk door middel van tankwagens (Rejowski & Pinto, 2003).

2.1.6.1 Opbouw van een olieraffinaderij

De bouw van een olieraffinaderij vereist miljarden euro's en daarnaast kost het ook nog eens miljoenen euro's om de olieraffinaderij te onderhouden. Een olieraffinaderij werkt zonder technische storingen het hele jaar door. Olieraffinaderijen kunnen een oppervlakte tot 80 hectaren innemen (Gary et al., 2007).

De opbouw van olieraffinaderijen verschilt wereldwijd afhankelijk van de lokale vraag naar voornamelijk benzine, diesel, stookolie en kerosine. West-Europa bijvoorbeeld heeft, in vergelijking met de Verenigde Staten, een hoge vraag naar diesel en kerosine, en een lagere vraag naar benzine en stookolie. Dit is het gevolg van de vele dieselmotoren en het gebruik van aardgas voor verwarming in West-Europa. Heden ten dage bestaan olieraffinaderijen die zo complex zijn dat ze in staat zijn om meer dan een dozijn types van aardolie te verwerken. Olieraffinaderijen verschillen in grootte, verfijning en de kosten zijn afhankelijk van de locatie, het type van aardolie dat kan worden verwerkt en de olieproducten die kunnen worden geproduceerd (Gary et al., 2007).

2.1.6.2 Capaciteit van een olieraffinaderij

Het is gebruikelijk om de capaciteit van olieraffinaderijen uit te drukken in termen van distillatiecapaciteit. Twee meetmethoden worden gebruikt: barrels per stream day (BPD) en barrels per calendar day (BPDC). De eerste term wordt gebruikt voor het maximum aantal vaten aardolie dat kan verwerkt worden indien de olieraffinaderij werkt op maximale capaciteit, onder optimale omstandigheden en er geen onderbrekingen voorkomen. De tweede term staat voor het aantal vaten aardolie dat een olieraffinaderij verwerkt onder normale omstandigheden, rekening houdend met milieubeperkingen, geplande en niet geplande onderbrekingen die te wijten zijn aan onderhoud of stilleggingen (Gary et al., 2007).

2.1.6.3 Niveaus van beslissingen in een olieraffinaderij

In een olieraffinaderij bestaan drie niveaus van plannen: het strategische, het tactische en het operationele. Strategische beslissingen gelden voor een tijdshorizon van enkele maanden tot meerdere jaren en zijn bedoeld voor doelstellingen op lange termijn. Dergelijke beslissingen worden onder andere gebruikt om te bepalen hoeveel aardolie en welke type van aardolie zal verwerkt worden. Een tijdshorizon van enkele maanden tot enkele kwartalen is de gebruikelijke tijdspanne voor tactische beslissingen. Deze beslissingen hebben betrekking op het productieplan van de olieraffinaderij en worden bepaald rekening houdend met de operationele opslagcapaciteit in de olieraffinaderij en in het distributiecentrum alsook met de pompcapaciteit. Operationele beslissingen ten slotte gaan uit van een tijdsspanne van enkele uren tot één maand en behandelen de beslissingen die gaan over de scheduling van olieproducten (Rejowski & Pinto, 2008).

2.1.6.4 Aardolie voorbereiden op de raffinageprocessen

Nadat de aardolie is gelost in opslagtanks, wordt de aardolie voorbereid in charging tanks om nadien in de destillatietoren te laden (Nikisha et al., 2011). Soms worden twee of meer charging tanks van verschillende types van aardolie samen aangesloten om de destillatietoren te voorzien van aardolie. Dit wordt gedaan indien de aardolie van één opslagtank niet de gewenste kwaliteit heeft. Zo kan het voorvallen dat een bepaald type van aardolie te zwaar is, waardoor onvoldoende aardolie in de bovenste sectie van de destillatietoren kan geraken. Daarnaast kan aardolie ook te licht zijn waardoor problemen ontstaan die te maken hebben met het onder controle houden van de druk in de destillatietoren. Deze problemen zijn echter meestal op voorhand geweten door de operatoren van de olieraffinaderij. Verder moet de destillatietoren constant voorzien worden van aardolie aangezien het stilleggen van de raffinageprocessen een zeer kostelijke en niet gewenste handeling is (Moro & Pinto, 2004).

2.1.6.5 Raffinageprocessen

De raffinage van aardolie is de laatste 20 jaar enorm complex geworden als gevolg van een stevigere competitie, strengere milieuwetgevingen en lagere winstmarges (Nikisha et al., 2011). Raffinageprocessen zijn chemische en technologische processen om aardolie om te vormen naar bruikbare olieproducten met specifieke eigenschappen. Het verhitten van de aardolie, het werken onder een bepaalde druk, het gebruik maken van bepaalde katalysatoren en het toevoegen van chemicaliën zijn verschillende processen die plaatsgrijpen in een olieraffinaderij (Gary et al., 2007).

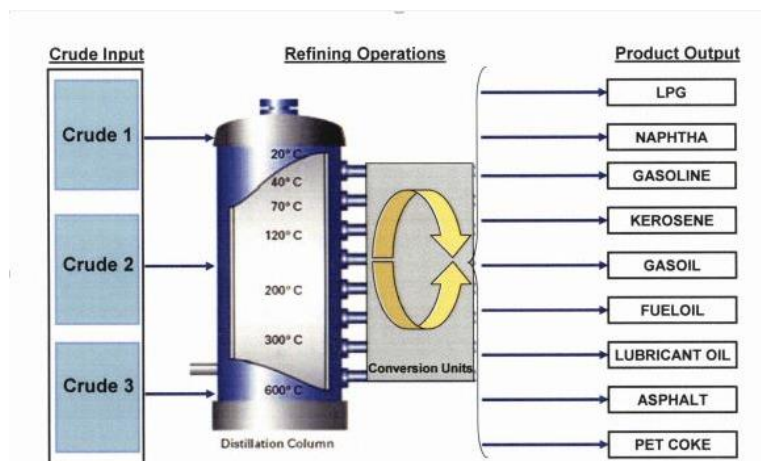
De raffinage van aardolie gebeurt traditioneel in vijf stappen. De eerste stap is *de destillatie* van de aardolie in een crude distillation unit (CDU) of ook wel destillatietoren genoemd (zie figuur 2). In een atmosferische distillatietoren wordt aardolie gescheiden in verschillende koolwaterstoffracties. De koolwaterstoffen in de aardolie hebben verschillende kookpunten afhankelijk van het aantal koolstoffen in iedere molecule en hoe deze koolwaterstoffen gerangschikt zijn (Nnadili, 2006). De aardolie wordt verhit en haalt temperaturen van 315 tot 370 graden Celsius (Gary et al., 2007). De destillatietoren bestaat uit verschillende leggers zodat de lichtere dampen naar de top kunnen stijgen en de dikkere olie condenseert naar de bodem (Nnadili, 2006).

De tweede stap zijn de *conversion processes*. In deze stap wordt de grootte of structuur van de koolwaterstoffen veranderd. Er zijn drie verschillende conversion processes. Een eerste conversion proces is de 'decomposition'. Dit houdt in dat grote koolwaterstofmoleculen worden afgebroken in kleinere koolwaterstofmoleculen met een lager kookpunt. Dit gebeurt voornamelijk door het krakingsproces. Een tweede conversion proces is de 'unification' waarin het tegenovergestelde gebeurt. Kleine moleculen worden samengevoegd door alkylering, polymerisatie en gerelateerde processen. Als derde is er de 'reforming'. In dit conversion proces worden de moleculen herschikt naar andere geometrische structuren. Dit gebeurt door isomerisatie, katalytische reforming en gerelateerde processen (Gary et al., 2007).

De derde stap zijn de *treatment processes*. De koolwaterstoffen worden voorbereid op additionele processen. Voorbeelden zijn het ontzouten, ontzwavelen, vloeibaarder maken, stropiger maken, zoeter maken en verwijderen van een teveel aan paraffine (Gary et al., 2007).

De vierde stap is de *blending*. Dit is een cruciale stap in het raffinageproces. Koolwaterstoffen worden gecombineerd met additieven zoals antioxidanten en corrosieremmers om een mix te creëren dat olieproducten oplevert met specifieke eigenschappen. Hierdoor worden kosten geminimaliseerd en prestaties gemaximaliseerd zonder kwaliteit te verliezen en bovendien wordt rekening gehouden met de vraag van klanten (Nikisha et al., 2011)

De vijfde en laatste stap zijn *de other refinery processes*. Enkele voorbeelden zijn onder andere het verder ontzwavelen, een behandeling met zuur, het koelen van de geproduceerde olieproducten, het transport naar de opslagtanks van de olieraffinaderij en het opslaan van olieproducten onder bepaalde omstandigheden (Gary et al., 2007).



Figuur 2: Destillatietoren (Rodrigue, Comptois, & Slack, 2013)

2.1.6.6 De interface

Door het injecteren en pompen van verschillende olieproducten achter elkaar in een pijplijn is het onvermijdelijk dat een contaminatie ontstaat als gevolg van het mengen van twee olieproducten. Het volume van deze contaminatie, in de literatuur ook wel interface of transmix genoemd, hangt af van parameters zoals de pijplijndiameter, de stroomsnelheid, de afstand die overbrugd moet worden, de topografie van de gebieden die een pijplijn doorkruist en het type van olieproducten die elkaar opvolgen (Cafaro & Cerdá, 2004).

Vaak worden de loten zo groot mogelijk gekozen om de interface te minimaliseren. Het mengen van twee verschillende olieproducten gebeurt vaak door de verplaatsing van een lichter olieproduct door een zwaarder olieproduct. Het zwaarder olieproduct heeft immers de neiging onder het lichter olieproduct te kruipen. Omwille van die reden is het ook belangrijk dat de pompen van de pijplijn weinig stilliggen aangezien het mengen bij stilstand sneller optreedt (Cafaro & Cerdá, 2008). De grootte van de interface hangt, zoals eerder kort aangehaald, af van de twee types van olieproducten die met elkaar in aanraking komen. Het is tijdens het opstellen van een schedule daarom aangeraden om twee types van olieproducten die bekend staan voor hoge interfaceverliezen niet achter elkaar te pompen (Herrán, De la Cruz, & De Andrés, 2010).

Interface detection gebeurt aan de hand van twee methoden: de volumetrische calculatie en de online density analysis. Beide methoden zijn inaccuraat maar meestal wordt de methode van volumetrische calculatie toegepast. Een hoeveelheid van 500 kubieke meter voor en na de geschatte tijd dat de interface optreedt, wordt bij het lossen van de olieproducten in het distributiecentrum aan de kant gehouden. Dit volume wordt naderhand terug opgestuurd naar de olieraffinaderij en op een speciale manier, die afhankelijk is van de types van olieproducten die met elkaar gemengd zijn, behandeld (Moro & Pinto, 2004). Om het mengen van twee olieproducten tegen te gaan wordt in de praktijk soms gebruikt gemaakt van 'plugs'. Dit zijn vloeistofbuffers die na elk lot worden geïnjecteerd (Cafaro & Cerdá, 2004).

Opslag van olieproducten in de olieraffinaderij

In olieraffinaderijen zijn vaak meerdere opslagtanks voor hetzelfde type olieproduct voorhanden (Rejowski & Pinto, 2003). In een olieraffinaderij wordt elke opslagtank gebruikt om slechts één type van olieproduct op te slaan. Deze beslissing vermijdt dat de opslagtanks gekuist moeten worden tussen het laden en lossen van verschillende types van olieproducten (Cafaro & Cerdá, 2004).

2.1.6.7 Transport naar en opslag van olieproducten in het distributiecentrum

Aangezien deze stap uit de Petroleum Supply Chain de focus van deze masterproef is, zal hier in de tweede en derde deelvraag concreet op worden ingegaan.

2.1.6.8 Distributie naar de eindklanten toe

De distributie van olieproducten vanuit het distributiecentrum naar de klanten toe gebeurt grotendeels door middel van tankwagens (Rejowski & Pinto, 2003).

2.1.7 Pijplijnen

Aangezien het transport van olieproducten vanuit een olieraffinaderij naar een distributiecentrum in deze masterproef alsook in de realiteit bijna altijd gebeurt via een multi-product pijplijn, is het noodzakelijk om even stil te staan bij de redenen waarom pijplijnen in het algemeen gebruikt worden in de olie-industrie, welke types van pijplijnverbindingen bestaan, enzovoort.

2.1.7.1 Voordelen

Pijplijnen worden sinds een veertigtal jaren gebruikt voor het transport van aardolie en olieproducten. Aangezien de jaarlijkse transportkosten miljarden euro's bedraagt wordt er sinds een dertigtal jaren meer aandacht besteed aan de scheduling van aardolie en olieproducten via pijplijnen (Herrán et al., 2010).

Pijplijnen werden oorspronkelijk enkel gebruikt voor het transport van aardolie naar olieraffinaderijen. Jaren later, toen de vraag naar olieproducten groter werd, en mede door de lage operationele kosten die een pijplijn veroorzaakt, besloten oliebedrijven om de functie van pijplijnen uit te breiden. Dit deden de oliebedrijven door pijplijnen aan te leggen tussen olieraffinaderijen en lokale distributiecentra (Rejowski & Pinto, 2003).

Ondanks de hoge investeringskost is het transport via pijplijnen de meest rendabele manier om grote hoeveelheden vloeistof over lange afstanden te transporteren. Dit komt omdat het gebruik van een pijplijn lage operationele kosten met zich meebrengt, een hoge betrouwbaarheid heeft, garant staat voor lage productieverliezen, amper milieuschade veroorzaakt. Daarnaast ondervindt het, in tegenstelling tot andere transportmodi, geen last van extreme weerscondities (De Souza Filho et al., 2013). Pijplijnen werken op een continue manier (Rejowski & Pinto, 2003) het hele jaar door ononderbroken (Cafaro et al., 2015). Ten slotte hebben pijplijnen geen last van ongebruikte capaciteit zoals bijvoorbeeld een binnenschip, dat zojuist olieproducten bij een klant heeft gelost wel heeft indien het leeg moet terugkeren (Cafaro & Cerdá, 2008). Een nadeel aan pijplijnen is het feit dat dit de traagste transportmodus is met snelheden van amper vijf tot dertien kilometer per uur (Cafaro & Cerdá, 2008).

Pijplijnen worden vooral gebruikt voor het transcontinentaal transport van aardolie en olieproducten. Intercontinentaal transport wordt voornamelijk uitgevoerd door olietankers. Regionaal en lokaal transport gebeurt door treinen en tankwagens (De Souza Filho et al., 2013).

2.1.7.2 Types van pijplijnverbindingen

Pijplijnen kunnen enkele honderden kilometers lang zijn maar sommige pijplijnen kunnen ook gigantische afstanden overbruggen. De Trans Siberische pijplijn bijvoorbeeld, is de langste pijplijn ter wereld met een lengte van 9344 kilometer en loopt van de Russische Arctische olievelden in Oost-Siberië naar West-Europa (Rodrigue, Comtois, & Slack, 2013).

Pijplijnen worden opgedeeld in twee grote groepen. Enerzijds zijn er de pijplijnen die gas vervoeren. Anderzijds zijn er de pijplijnen die vloeistof transporteren (MirHassani & Jahromi, 2011). Gegeven de verschillen tussen de producten die worden getransporteerd, zijn pijplijnen ook aangepast aan het transport van verschillende types van aardgas, aardolie of olieproducten (De Souza Filho et al., 2013). Pijplijnen kunnen een grote variatie aan olieproducten transporteren maar aardolie en olieproducten worden nooit doorheen dezelfde pijplijn gepompt (Cafaro & Cerda 2004). Pijplijnen die gebouwd zijn voor het transport van aardolie werken meestal maar in één richting. Pijplijnen die gebouwd zijn voor het transport van olieproducten daarentegen werken bijna altijd in twee richtingen (Rejowski & Pinto, 2008).

Pijplijnen die aardolie en olieproducten transporteren hebben meestal een diameter van vijf tot tien centimeter en zijn opgedeeld in drie klassen. De eerste klasse bestaat uit pijplijnen die recht zijn en geen vertakkingen hebben (Fernandes, Relvas, & Barbosa-Póvoa, 2014). De meest eenvoudige pijplijnverbinding van deze klasse bestaat uit één bron, maakt gebruik van één pijplijn, heeft één bestemming en kan één type olieproduct of meerdere types van aardolie vervoeren. Daarnaast bestaan ook pijplijnen die verschillende types van olieproducten kunnen vervoeren. Dit soort pijplijnen worden polyducts genoemd. Een realistischere en ingewikkeldere pijplijnverbinding daarentegen bestaat uit één pijplijn die meerdere vertrek- en/of aankomstpunten heeft die achter elkaar zijn gelegen (Herrán et al., 2010). De tweede klasse is de boomstructuur. Olieproducten vertrekken vanuit één vertrekpunt maar kunnen onderweg opgesplitst worden in meerdere pijplijnvertakkingen en hebben dus bijgevolg meerdere aankomstpunten die niet achter elkaar gelegen zijn. De laatste klasse ten slotte is een pijplijnnetwerk. Een pijplijnnetwerk heeft meerdere vertrek- en aankomstpunten en bestaat uit meerdere pijplijnen die vertrekken bij dezelfde olieraffinaderij of die vertrekken bij verschillende olieraffinaderijen en aankomen bij verschillende distributiecentra. Naast olieraffinaderijen en distributiecentra worden ook vaak havens betrokken in dit pijplijnnetwerk (Fernandes, et al., 2014).

Olieproducten worden doorheen een pijplijn gepompt door middel van centrifugale pompen die zich bevinden in zogenaamde pompstations. Eén van deze pompstations bevindt zich in het begin van de pijplijn, de andere pompstations situeren zich telkens om de tien à 160 kilometers afhankelijk van de topografie van de omgeving waar de pijplijn doorloopt en de pijplijn capaciteit die vereist is (Rejowski & Pinto, 2003).

Een pijplijninfrastructuur kan eigendom zijn van één of meerdere oliebedrijven en kan speciaal ontworpen zijn om verschillende olieproducten van één enkele verkoper te transporteren naar één of meerdere klanten, of olieproducten van meerdere verkopers naar één of meerdere klanten. Mits een degelijke planning zullen de verschillende loten niet gemengd worden (Fernandes et al., 2014).

Het plaatsen van pijplijnen is meestal onafhankelijk van het terrein maar soms moet toch rekening worden gehouden met de geografische locatie. In Arctische regio's bijvoorbeeld kunnen pijplijnen niet onder de grond begraven worden als gevolg van permafrost. Pijplijnen mogen daarnaast ook vaak niet door beschermde natuurgebieden lopen en voorts spelen geopolitieke redenen geregeld een rol (Rodrigue et al., 2013).

2.1.8 Actuele cijfers uit de olie-industrie

Wereldwijd

Aardolie is wereldwijd het exportproduct met het grootste marktaandeel. In 2014 bedroeg het aandeel maar liefst 7,8% van alle export met een waarde van 1,151 triljoen USD. De landen uit het Midden-Oosten zijn goed voor de grootste export, namelijk 623,9 miljard USD of 43% van de globale export van aardolie (Workman, 2016).

Om een beter zicht te krijgen op de belangrijkste landen die aardolie en olieproducten oppompen, produceren en/of verhandelen worden hieronder enkele concrete, actuele cijfers weergegeven (The World Factbook, 2016). Een overzicht van de olie-cijfers is gegeven in tabel 1.

De jaartallen die terug te vinden zijn achter de cijfers zijn de meest actuele gegevens waar informatie over te vinden is. Het is mogelijk dat landen met twee verschillende jaartallen met elkaar worden vergeleken maar dit zal echter niet zorgen voor een significant vertekend beeld.

In tegenstelling tot wat de meeste personen veronderstellen, is het niet Saudi-Arabië die het meeste aardolie oppompt maar wel Rusland met 10,84 miljoen vaten per dag (2014), kort gevolgd door Saudi-Arabië met 9,735 miljoen vaten per dag (2014). De top drie wordt vervolledigd door de Verenigde Staten met 8,653 vaten per dag (2014).

Qua export van aardolie leidt Saudi-Arabië met 7,658 miljoen vaten per dag (2012), gevolgd op respectabele afstand door Rusland met 4,594 miljoen vaten per dag (2013) en Canada met 2,733 miljoen vaten per dag (2013). Het valt op dat de Verenigde Staten hier niet in de top drie staan en dus veel van zijn aardolie zelf omvormt tot olieproducten.

Qua import van aardolie staan de Verenigde Staten op de eerste plaats met 9,08 miljoen vaten per dag (2013). Op plaats twee staat China met 6,167 miljoen vaten per dag (2014) en op plaats drie staat India met 3,812 miljoen vaten per dag (2013).

Bij de productie van olieproducten leiden de Verenigde Staten met 19,11 miljoen vaten per dag (2013). China staat tweede met iets meer dan de helft van de Verenigde Staten, namelijk 9,879 miljoen vaten per dag (2012). Rusland staat derde met 6,053 miljoen vaten per dag (2012).

Indien gekeken wordt naar de export en import van olieproducten valt op dat deze cijfers het laagst zijn. Bij de export van olieproducten staat Rusland eerste met 3,3 miljoen vaten per dag (2013) voor de Verenigde Staten met 2,992 miljoen vaten per dag (2013). Op plaats drie staat Nederland met 2,098 miljoen vaten per dag (2013). Bij de import van olieproducten staat Singapore op kop met 1,914 vaten per dag (2013), kort gevolgd door Nederland met 1,838 vaten per dag (2013) en op iets ruimere afstand staan de Filipijnen met 1,577 miljoen vaten per dag (2014).

Verder valt op dat de Verenigde Staten als grootste economie de hoogste consumptie van olieproducten heeft met 19,03 vaten per dag (2014). Op plaatsen twee en drie staan China en Japan met respectievelijk 10,48 miljoen vaten per dag (2013) en 4,298 miljoen vaten per dag (2014).

Ten slotte zijn er de geschatte aardoliereserves die landen in 2015 nog bezitten. Venezuela beschikt over een reserve van 298,4 miljard vaten, Saudi-Arabië heeft een voorraad van 268,3 miljard vaten en Canada beschikt over een reserve van 172,5 miljard vaten.

België

België behoort niet tot de 101 landen die aardolie produceren (2014). Echter importeert België wel 618,4 duizend vaten per dag (2013) en exporteert het 54,9 duizend vaten per dag (2013). Hiermee staat het land respectievelijk op de 17^e en 44^e plaats. Verder staat België op de 14^e plaats voor zowel de import van olieproducten met 548 duizend vaten per dag (2013) alsook de export van olieproducten met 497,5 duizend vaten per dag (2013). Qua productie en consumptie van aardolieproducten bevindt België zich op plaats 27 en plaats 31 met respectievelijk 666,9 duizend vaten per dag (2013) en 618,7 duizend vaten per dag (2014).

Tabel 1: Cijfers uit de olie-industrie (The World Factbook, 2016)

Aantal vaten	Plaats 1 (in miljoenen)	Plaats 2 (in miljoenen)	Plaats 3 (in miljoenen)
Productie aardolie (per dag)	Rusland: 10,840 (2014)	Saudi-Arabië: 9,735 (2014)	VS: 8,653 (2014)
Export aardolie (per dag)	Saudi-Arabië: 7,658 (2012)	Rusland: 4,594 (2013)	Canada: 2,733 (2013)
Import aardolie (per dag)	VS: 9,080 (2013)	China: 6,167 (2014)	India: 3,812 (2013)
Productie olieproducten (per dag)	VS: 19,110 (2013)	China: 9,879 (2012)	Rusland: 6,053 (2012)
Export olieproducten (per dag)	Rusland: 3,3 (2013)	VS: 2,992 (2013)	Nederland: 2,098 (2013)
Import olieproducten (per dag)	Singapore: 1,914 (2012)	Nederland: 1,838 (2013)	Filipijnen: 1,577 (2014)
Consumptie olieproducten (per dag)	VS: 19,030 (2014)	China: 10,48 (2013)	Japan: 4,298 (2014)
Reserves aardolie (in totaal)	Venezuela: 298400 (2015)	Saudi-Arabië: 268300 (2015)	Canada: 172500 (2015)

2.2 Transport en opslag van olieproducten

In deze deelvraag wordt enkel besproken hoe het transport van olieproducten vanuit een olieraffinaderij via een multi-product pijplijn naar een distributiecentrum en de opslag daarvan in de praktijk precies gebeurt.

2.2.1 Voorbereiden van een schedule

De optimalisatiebenadering voor het schedulen van olieproducten via een pijplijn gebeurt in twee hiërarchische stappen. De eerste stap is de aggregate planning step. Deze bepaalt de grootte van de loten die doorheen de pijplijn gepompt worden, de volgorde waarin de loten in de pijplijn geïnjecteerd worden en de allocatie van de loten aan de verschillende opslagtanks. De tweede stap is de detailed planning step. Deze stap verfijnt de aggregate planning step door een gedetailleerder schema van het injecteren en het lossen van de loten te bepalen (Cafaro et al., 2015).

Distributiecentra contacteren olieraffinaderijen en geven meestal een bestelling door voor een middellange periode van een maand. Meestal worden de bestellingen een week voor het einde van de maand doorgegeven waardoor de olieraffinaderij een week de tijd heeft om een gedetailleerde schedule uit te werken (Cafaro & Cerdá, 2008).

Vervolgens wordt getracht om een bestelling op te delen in zoveel mogelijk cycli van dezelfde grootte. Een cyclus bestaat uit een bepaalde volgorde van loten van alle verschillende olieproducten die geïnjecteerd moeten worden (Rejowski & Pinto, 2003). Een scheduler kan tijdens een pompcyclus kiezen tussen $n!$ volgordes van olieproducten. Uiteraard is dit in de realiteit aanzienlijk minder aangezien veel volgordes van olieproducten omwille van productieverliezen afgeraden zijn (De Souza Filho et al., 2013). Vanaf het moment dat het pompen van een volledige cyclus voltooid is, start een volgende cyclus. Indien een olieraffinaderij bij een bepaalde bestelling bijvoorbeeld een cyclus van twee weken toepast, moet het distributiecentrum een opslagcapaciteit voorzien voor elk type van olieproduct van 14 dagen. Met een cyclus van een week daarentegen moet het distributiecentrum een opslagcapaciteit van slechts zeven dagen voorzien. Het nadeel van de cyclus van een week ten opzichte van die van twee weken is het feit dat het volume van de interface zal verdubbelen. Door het distributiecentrum moet een afweging worden gemaakt tussen de kosten voor beschikbare opslagcapaciteit en de kosten die de interfaces met zich meebrengen (Rejowski & Pinto, 2003).

Ten slotte moet ook rekening worden gehouden met de vertraging die optreedt bij het versturen van de loten. Er verloopt een significante tijd tussen het moment van het injecteren van een bepaald lot en het ogenblik dat dit lot in het distributiecentrum aankomt. Deze tijdsduur schommelt meestal tussen drie en tien dagen. De tijdsduur is afhankelijk van de lengte van de pijplijn en de locatie van het distributiecentrum. Indien de tijdshorizon korter is dan de gemiddelde levertijd, moeten de meeste klantvragen voldaan worden door de voorraad die zich in het distributiecentrum bevindt of in de pijplijn zit (Cafaro & Cerdá, 2008).

2.2.2 Uitvoeren van een schedule

De opgestelde schedule wordt uitgevoerd door dispatchers vanuit een controlekamer die vanop afstand de loten kunnen laden, transporteren, lossen (Rejowski & Pinto, 2003), de pompen kunnen starten en uitzetten, de kleppen van de pijplijnen openen en sluiten, op een volledig geautomatiseerde wijze (Cafaro et al., 2015). Loten kunnen daarnaast gedurende de hele rit gemonitord worden. De dispatchers volgen elk lot op om ervoor te zorgen dat de connectie naar de opslagtank goed verloopt en deze open is als er een lot aankomt. De pompen van de pijplijn moeten onmiddellijk stilgelegd worden indien het distributiecentrum de levering niet kan ontvangen bijvoorbeeld door onvoldoende opslagcapaciteit (Rejowski & Pinto, 2003). De planning moet zo efficiënt mogelijk zijn om de energieconsumptie, die zorgt voor de grootste operationele kost, te minimaliseren (Cafaro et al., 2015). Een scheduler is niet enkel een planner maar ook een revisor aangezien het soms nodig kan zijn om een schedule aan te passen indien het distributiecentrum nieuwe eisen stelt (Cafaro & Cerdá, 2008).

Pijplijnen zijn altijd gevuld met olieproducten die niet samendrukbaar zijn. Als dus een bepaald volume in de pijplijn wordt geïnjecteerd, komt datzelfde volume aan het einde van de pijplijn ook uit. Deze benadering van niet-samendrukbaarheid wordt vaak gebruikt bij de ontwikkeling van een schedule (De Souza Filho et al., 2013).

2.2.3 Minimalisatie van de operationele kosten

Olieraffinaderijen en distributiecentra streven naar zo laag mogelijke operationele kosten. Operationele kosten bestaan uit opslagkosten in zowel de olieraffinaderijen als in de distributiecentra, de pompkosten en ten slotte de transitiekosten (Rejowski & Pinto, 2003).

Pompkosten zijn proportioneel met de hoeveelheid olieproducten die door een pijplijn worden gepompt en de afstand die deze olieproducten moeten afleggen. Het is aangeraden om een schedule op te stellen dat rekening houdt met tijdsperiodes van intensieve energieconsumptie. Tussen die uren is er een significante stijging in pompkosten en zou het wenselijk zijn om zo weinig mogelijk olieproducten in deze piekperiode te transporteren. Opslagkosten vervolgens zijn proportioneel tot de opgeslagen hoeveelheid olieproducten in alle opslagtanks alsook tot de tijd dat deze olieproducten in de opslagtanks moeten verblijven. Transitiekosten zijn de meest uitdagende kosten. Zij zijn de productieverliezen ontstaan door contaminatie. De kost ontstaat door het opnieuw omvormen van deze interface naar olieproducten (Rejowski & Pinto, 2003).

2.2.4 Continue of discrete wiskundige programmeringsmodellen

Het scheduleren van het transport van olieproducten via een multi-product pijplijn en de opslag in het distributiecentrum vereisen complexe afwegingen (Rejowski & Pinto, 2008). Dit gebeurt vaak door het gebruik van optimalisatie. Operational Research (OR) en Constraint Programming (CP) zijn twee optimalisatietechnieken waar het laatste decennium veel gebruik van wordt gemaakt. Meer bepaald zijn Mixed Integer (Non) Linear Programming (MIL(N)LP) en Constraint Logic Programming (CLP) de samenvloeiing van deze twee optimalisatietechnieken. In de literatuur over de scheduling van

olieproducten wordt vooral gebruik gemaakt van MILP modellen maar doch komen MINLP modellen ook aan bod (Magatão & Neves-Jr, 2005).

Een MILP of MINLP model maakt gebruik van een continue of discrete tijdsrepresentatie. De eerste toepassingen omtrent het modelleren van schedules steunde op discrete tijdsrepresentaties. De tijdshorizon bij een discrete tijdsrepresentatie wordt verdeeld in een eindig aantal tijdsintervallen van uniforme lengte. Het begin en einde van elk tijdsinterval komt overeen met een gebeurtenis. Het nadeel van discrete tijdsrepresentatie echter is dat deze techniek leidt tot grote modellen (Floudas & Lin, 2004). Dit nadeel wordt aangetoond aan de hand van onderstaand voorbeeld.

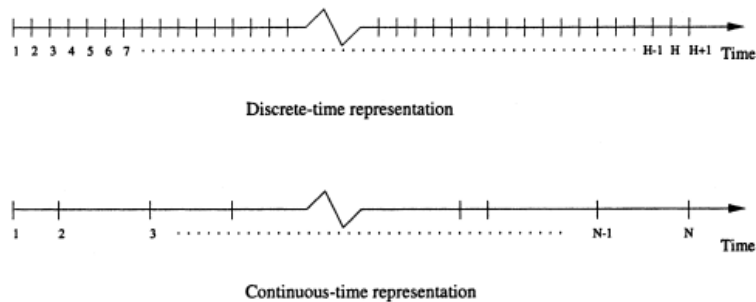
Stel dat de 'completion time'¹² van het eerste lot dat gepompt wordt gelijk is aan 11u, die van het tweede lot gelijk is aan 22u en die van het derde lot gelijk is aan 33u. Er moet vervolgens gebruik worden gemaakt van de grootste gemene deler om een discrete tijdschaal te verkrijgen. De grootste gemene deler bedraagt 11 waardoor de intervallen [0,11], [11,22] en [22,33] zijn. In dit geval is er weinig rekenwerk. Echter als de completion time dit keer zes, tien en 15 uur is, is de grootste gemene deler gelijk aan één. Dus moeten 15 intervallen met een lengte van één worden aangemaakt: [0,1] tot en met [14,15]. Het rekenwerk verviervoudigt. Het verschil tussen een discrete en continue tijdsrepresentatie wordt verder verduidelijkt in figuur 3.

Het is belangrijk om te weten dat deze laatste situatie in de praktijk veel vaker voorkomt. Omwille van de beperkingen van de discrete tijdsrepresentatie hebben onderzoekers de continue tijdsrepresentatie ontwikkeld. Gebeurtenissen mogen plaatsvinden op elk moment in de tijd en het modelleren wordt geregeld door speciale 'time event variables'. De variabelen zijn in staat de tijd van het begin en het einde van een tijdsinterval, namelijk de events, te berekenen. Alle niet-actieve tijdsintervallen, die bij discrete tijdsrepresentatie aanwezig zijn, worden achterwege gelaten waardoor de mathematische programmeringsproblemen verkleinen en minder rekentijd vereisen. Het modelleren van deze speciale time event variables kan wel leiden tot complexere modellen (Floudas & Lin, 2004).

Dezelfde idee kan ook toegepast worden voor het volume van de pijplijn. Bij een discrete volumerepresentatie wordt de pijplijn in uniforme delen verdeeld. Bij een continue volumerepresentatie is dat niet vereist (Floudas & Lin, 2004).

Naast een MILP en MINLP model kan er aanvullend ook gebruik gemaakt worden van een heuristische methode om tot het resultaat te komen. Dit gebeurt meestal als het model te complex is voor een single model en in dat geval wordt gesproken van een decompositiemodel (Rejowski & Pinto, 2008).

¹² Het tijdstip waarop het pompen van een volledig lot voltooid is. De completion time begint bij nul en blijft doorlopen.



Figuur 3: Discrete versus continue tijdsrepresentatie (Floudas & Lin, 2004)

2.2.5 Assumpties en vereiste data bij de opmaak van een schedule

Schedulen is een complexe taak aangezien rekening moet worden gehouden met veel factoren. Enerzijds zal er data over verschillende zaken beschikbaar zijn. Anderzijds moeten uiteraard ook assumpties worden gemaakt. MirHassani en BeheshtiAsl (2013) maakte in hun artikel een uitgebreide opsomming gemaakt die nauw aansluit bij de realiteit.

Beschikbare data

- Het volume en type van olieproduct dat aanwezig is in de opslagtanks van de olieraffinaderij.
- De matrix van mogelijke en verboden volgordes van olieproducten die elkaar wel en niet mogen opvolgen is gekend. Door een te hoge interface zijn sommige olieproducten die elkaar opvolgen niet gewenst.
- De initiële pijplijncondities: de volgordes en volumes van de loten die bij de start van het pompen van een nieuwe bestelling op tijdstip 0h nog in de pijplijn zitten.
- De interface in kubieke meter van elk paar olieproducten.
- De dagelijkse vraag naar olieproducten in het distributiecentrum gedurende de tijdshorizon.
- De initiële voorraad van elk olieproduct in de opslagtanks van het distributiecentrum.
- De grootte van de constante pompsnelheid
- De pijplijn capaciteit
- Het aantal keer dat de pijplijn moet worden stilgelegd binnen een bepaalde tijdshorizon.
- De tijdshorizon waarbinnen de loten van een bepaalde bestelling moeten worden gepompt.
- De maximum capaciteit van de opslagtanks in de olieraffinaderij.
- De minimum en maximum grootte van elk lot voor elk olieproduct.
- Elk lot dat geleverd wordt in het distributiecentrum moet nog een tijdje uit het verdere distributienetwerk gehouden worden aangezien deze nog even moet settelen voor een betere kwaliteit. De settle periode is productafhankelijk en op voorhand geweten.
- Het minimum en maximum volume dat opslagtanks in het distributiecentrum voor elk olieproduct mogen ontvangen.

Assumpties

- Een pijplijn werkt in één richting of in twee richtingen.
- De pijplijn is altijd gevuld met olieproducten. Olieproducten zijn niet samendrukbaar waardoor er perfect geregeld kan worden hoeveel volume er van een bepaald lot gelost wordt in het distributiecentrum. Het volume dat in het distributiecentrum gelost wordt, is afhankelijk van het volume dat in de pijplijn wordt geïnjecteerd.
- In het distributiecentrum worden alle opslagtanks voor elk olieproduct beschouwd als één geheel.
- Het volume van ieder lot moet gelegen zijn tussen een gekend minimum en maximum volume die afhankelijk per olieproduct.
- Twee opéénvolgende loten mogen niet hetzelfde olieproduct bevatten.
- Het injecteren van olieproducten vindt alleen plaats in de olieraffinaderij. Een distributiecentrum is niet instaat om dit te doen.
- De olieraffinaderij is in staat om alle bestelde olieproducten te produceren.
- Op het moment van het opstellen van het schedule zijn de gevraagde olieproducten van het distributiecentrum bekend.
- Er zijn boetes voor de olieraffinaderij indien een lot niet binnen een overeengekomen dag wordt geleverd.
- Het pompen van de olieproducten kan worden onderbroken.
- Tijdens het lossen van olieproducten in het distributiecentrum kan de pijplijn maar aan één opslagtank gekoppeld worden.
- Tijdens de settle periode van loten, kunnen deze loten niet gebruikt worden om te voldoen aan de vraag van de klanten.
- De settle periode start pas nadat een lot volledig is gelost in een opslagtank.

2.2.6 Overzicht van publicaties omtrent scheduling van olieproducten

De artikels die hieronder worden besproken, zijn enkel van toepassing op de scheduling van het transport en/of het voorraadbeheer van aardolie of olieproducten. Daarnaast vormen de artikels die worden overlopen niet alle mogelijke artikels die te maken hebben met het transport en opslag van aardolie of olieproducten maar zijn het wel de belangrijkste. Verder zijn al deze artikels eigenhandig doorgenomen. Er werd dus niet voortgegaan op samenvattingen uit andere artikels.

De meeste auteurs gebruikten een MILP model en pasten de continue tijdsrepresentatie het vaakst toe. Geregeld werd, naast het klassieke MILP en MINLP model, ook gebruik gemaakt van Constraint Logic Programming of andere heuristische methodes om een bijna optimale oplossing te verkrijgen. In dat geval wordt gesproken over decompositiemodellen. Single models maken enkel gebruik van een MILP model of een MINLP model.

2.2.6.1 Opsomming artikels in chronologische volgorde

Hane en Ratliff (1995) waren een van de eersten die de scheduling van olieproducten in een systeem met één pijplijn bespraken. Hun model was eerder algemeen aangezien het aantal bestemmingen niet werd vermeld. De bedoeling was om de pomp- en onderhoudskosten te minimaliseren. Er werd gebruik gemaakt van een MILP model met een discrete tijds- en volumerepresentatie. Het probleem werd opgesplitst in deelproblemen waardoor sprake is van een decompositiemodel.

Shah (1996) bestudeerde het transportprobleem van aardolie vanuit een haven via één pijplijn naar een olieraffinaderij alsook de opslag daarvan. Hij maakte gebruik van een MILP model en paste de discrete tijdsrepresentatie toe. Het model werd opgedeeld in twee deelproblemen waardoor er kan gesproken worden van een decompositiemodel.

Pinto en Joly (2000) schreven een artikel omtrent de scheduling van aardolie via één pijplijn naar een olieraffinaderij. Dit probleem werd geformuleerd als een MILP en een MINLP model. De modellen werden gebaseerd op continue maar ook op discrete tijdsrepresentaties. Het MILP model werd vergeleken met het MINLP model. De resultaten verschilden weinig van elkaar. Er werd gescheduled voor een tijdshorizon van enkele dagen.

Magalhaes en Shah (2003) ontwikkelden een MILP model met een continue tijdsrepresentatie voor het schedulen van aardolie op korte termijn. Een haventerminal werd door middel van één pijplijn verbonden met een olieraffinaderij. De doelstelling was om de afwijking tussen het geplande en het effectieve transport in kaart te brengen.

Jia en Ierapetritou (2003) stelden een decompositiemodel voor om de complexiteit van het mengen van benzine en het leveren van dit mengsel via één pijplijn aan een distributiecentrum op korte termijn te schedulen. Er werd tweemaal gebruik gemaakt van een MILP model en in beide gevallen werd de continue tijdsrepresentatie toegepast.

Rejowski en Pinto (2003) bestudeerden het schedulen van olieproducten op korte termijn. De tijdshorizon bedroeg enkele dagen. Het model bestond uit een olieraffinaderij die verbonden was via één pijplijn met vijf distributiecentra. De auteurs maakten gebruik van een grootschalig MILP model en pasten de discrete tijds- en volumerepresentatie toe. Rejowski en Pinto ontwikkelden twee single modellen.

Rejowski en Pinto (2004) brachten een jaar later, een verbeterd MILP model voor hetzelfde probleem uit. Er werden enkele nieuwe beperkingen toegevoegd om het model realistischer te maken zoals onder andere een initiële voorraad in de pijplijn.

Cafaro en Cerdá (2004) publiceerden in 2004 een alternatief model voor hetzelfde probleem dat Rejowski en Pinto (2003) oplosten. Er werd gebruik gemaakt van een continue tijds- en volumerepresentatie. Voor vergelijkingsredenen, onderzochten de auteurs dezelfde tijdshorizon en vonden de optimale oplossing in slechts een paar seconden. Cafaro en Cerdá maakten in dit model wel gebruik van plugs. Wat daarnaast ook toegevoegd werd, was het aanrekenen van boetes indien de loten gepompt werden tijdens piekuren

Magatão et al. (2004) presenteerden een decompositiemodel om olieproducten op korte termijn te schedulen voor één pijplijn die in twee richtingen werkte. De pijplijn verbond een haven met een olieraffinaderij. De optimalisatiestructuur was gebaseerd op een MILP model, een hulp MILP model en een methode om de tijdsmomenten te meten. De tijdshorizon bedroeg vijf dagen. Er werd gebruik gemaakt van uniforme discrete tijdsintervallen.

Moro en Pinto (2004) onderzochten het probleem van het voorraadbeheer van aardolie in een bestaande olieraffinaderij die verschillende types van aardolie kreeg aangeleverd op korte termijn. Er werden twee modellen ontwikkeld: een MILP model en een MINLP model. Het MILP model paste een continue tijdsrepresentatie toe. Het MINLP model paste een discrete tijdsrepresentatie toe. De resultaten toonden aan dat het MINLP model efficiënter werkt. Er werd gemodelleerd voor een tijdshorizon van vier dagen.

Magatão et al. (2005) verbeterden een jaar later hun eerder gepubliceerde MILP model. Het model werd op een efficiëntere manier opgelost door gebruik te maken van een hybride techniek die MILP combineert met Constraint Programming. De oplossingstijd daalde.

Relvas et al. (2006) bestudeerden het schedulen van olieproducten vanuit een olieraffinaderij via één pijplijn naar een distributiecentrum. Daarnaast werd tevens het voorraadbeheer in het distributiecentrum in kaart gebracht. Een MILP model werd ontwikkeld met een continue tijds- en volumerepresentatie. Drie verschillende scenario's werden geanalyseerd voor een tijdshorizon van een maand. Een vaste, gemixte en vrije volgorde van loten werd telkens door middel van een single model opgelost. De vrije volgorde werd daarnaast ook eenmaal opgelost met een decompositiemodel. De tijdshorizon van een maand werd in het laatste geval opgesplitst in tweemaal 15 dagen. De finale condities van de eerste 15 dagen werden gebruikt als initiële condities voor de volgende 15 dagen.

Relvas et al. (2007) breidden het werk van Relvas et al. (2006) uit door het mogelijk te maken om een initiële schedule periodiek aan te passen. Dit werd succesvol toegepast voor een tijdshorizon van een maand.

Neves-Jr. et al. (2007) bestudeerden het schedulen van een bestaand pijplijnnetwerk. Dit gebeurde aan de hand van een MILP model met continue tijdsrepresentatie. Het pijplijnnetwerk bestond uit 15 pijplijnen. Er waren connecties tussen negen gebieden: drie olieraffinaderijen, vijf distributiecentra en een haven. Meer dan tien verschillende olieproducten werden getransporteerd. Voor het oplossen werd gebruik gemaakt van een decompositiemodel omdat het probleem werd opgedeeld in drie delen. De toewijzing aan de juiste pijplijnen, de opvolging van de activiteiten en de tijd die de pijplijnen gebruiken voor de activiteiten. Een tijdshorizon van zeven tot 30 dagen werd gemodelleerd. Een heuristische methode ging vooraf om onder andere de volumes en de volgorde van de loten te bepalen.

Rejowski en Pinto (2008) stelden vier jaar na hun verbeterde versie een nieuw model voor hetzelfde probleem voor. Dit keer werd het model echter gebaseerd op MINLP. De auteurs vergeleken de discrete tijdsrepresentatie met de continue tijdsrepresentatie. De continue tijdsrepresentatie kwam er voor dezelfde tijdshorizon als beste uit.

Cafaro en Cerdá (2008) ontwikkelden een MILP model met een continue tijdsrepresentatie die handelde over hetzelfde probleem als dat van 2004. Bovendien baseerden ze zich op het werk van Relvas et al. (2006). Deze keer was het model echter dynamischer en werd gebruik gemaakt van een bewegende tijdshorizon. Dit wil zeggen dat de initiële schedule periodiek kon aangepast worden. Een bestaand probleem waarin een olieraffinaderij vier olieproducten via een pijplijn naar vijf distributiecentra transporteerde, werd succesvol opgelost.

Cafaro en Cerdá (2009) publiceerden een nieuw MILP model voor het transport van olieproducten via een pijplijn vanuit drie olieraffinaderijen naar twee of drie distributiecentra. De continue tijds- en volumerepresentatie werd gebruikt. Het werd succesvol opgelost voor een tijdshorizon van tien dagen.

Mirhassani en Ghorbanalizadeh (2008) bestudeerden de boomstructuur voor het transport van olieproducten. Olieproducten werden vanuit een olieraffinaderij verzonden via één pijplijn die zich onderweg opsplijste in meerdere richtingen en dus olieproducten leverden bij verschillende distributiecentra. Er werd gebruikt gemaakt van een discrete tijds- en volumerepresentatie

Karappiah et al. (2008) stelden verbeterde methodes voor om de optimalisatie van de scheduling voor het transport van aardolie in kaart te brengen. Er werd beroep gedaan op een MILP en een MINLP model die beiden de continue tijdsrepresentatie toepasten. De auteurs maakten gebruik van een onder- en bovengrens om het globale optimum te bepalen. De oplossingen uit het MILP model werden gebruikt om de ondergrens te berekenen. De oplossingen uit het MINLP model werden gebruikt om de bovengrens te bepalen. Er werden tevens heuristische methodes toegepast.

Relvas et al. (2009) verbeterden het model van Relvas et al. (2006) door op voorhand een heuristische methode uit te voeren waarin de volgorde van de loten op voorhand werd vastgelegd. Deze heuristische methode voorzag informatie over de meest gewenste volgorde van loten rekening houdend met de startvoorwaarden en de beperkingen

Herrán et al. (2010) combineerden verschillende pijplijnen voor het transport van olieproducten tot een pijplijnnetwerk. Het MILP model ontwikkeld voor op korte termijn maakte gebruik van een discrete tijds- en volumerepresentatie. De doelstelling was de minimalisatie van de totale kosten.

Boschetto et al. (2010) bestudeerden een bestaand Braziliaans pijplijnnetwerk. Een hiërarchische benadering werd toegepast die gebruik maakte van een MILP model die de continue tijdsrepresentatie en een van set van heuristische methodes toepaste. Meer dan 14 types van olieproducten werden getransporteerd tussen vier olieraffinaderijen, twee havens, zes distributiecentra en twee lokale consumentenmarkten.

Cafaro et al. (2011) bestudeerden het transport van olieproducten vanuit één olieraffinaderij naar meerdere bestemmingen. Er werd gebruik gemaakt van een plan dat uit twee stappen bestond. De geaggregeerde planning werd gedaan door een MILP model dat gebruik maakte van continue tijdsrepresentatie. Deze resultaten werden verfijnd door een MILP model dat gebruik maakte van een discrete tijdsrepresentatie in combinatie met een heuristische methode.

Mirhassani en Jahromi (2011) brachten een MILP model uit dat gebaseerd was op een continue tijdsrepresentatie voor het scheduleren van olieproducten op korte termijn. Olieproducten werden vanuit een olieraffinaderij via een boomstructuur naar een aantal distributiecentra getransporteerd. Het model werd succesvol toegepast in de praktijk.

Cafaro et al. (2012) presenteerden in hun artikel een nieuw MILP model voor het scheduleren van olieproducten vanuit een olieraffinaderij via een pijplijn met simultane leveringen aan meerdere distributiecentra.

Relvas et al. (2013) publiceerden twee alternatieve MILP modellen die gebruik maakten van een discrete tijdsrepresentatie om te voldoen aan de bestelling van een distributiecentrum op middellange termijn. Verschillende olieproducten werden via een pijplijn getransporteerd vanuit een olieraffinaderij naar een distributiecentrum. De sterkte van het model kwam door het gegeven dat het geen bijkomende methodes vereiste om het op te lossen. Het model was gebaseerd op een bestaand probleem.

MirHassani en BeheshtiAsl (2013) ontwikkelden een MILP model met een discrete tijdsrepresentatie voor het scheduleren van olieproducten vanuit een olieraffinaderij via één pijplijn naar een distributiecentrum. Niet enkel de volgorde van de loten werd vastgelegd maar ook het opvolgen van de loten en het voorraadbeheer in het distributiecentrum werd onderzocht. Dit werd toegepast voor een horizon op korte termijn. Voor een horizon op lange termijn was dit model niet in staat om binnen een redelijke termijn bruikbare resultaten op te leveren.

De Souza Filho et al. (2013) bespraken een pijplijnnetwerk met vier havens, vier olieraffinaderijen en acht pijplijnen waarin verschillende olieproducten werden getransporteerd. Er werd gebruik gemaakt van een MILP model. De resultaten werden verbeterd door gebruik te maken van een bijkomende heuristische methode. In vergelijking met de vorige modellen die ook handelden over een pijplijnnetwerk, werkte dit model efficiënter. Het werd gemodelleerd voor een tijdshorizon van een week en succesvol getest in drie bestaande pijplijnnetwerken.

Cafaro et al. (2015) ontwikkelden een MILP model met een continue tijds- en volumerepresentatie voor de scheduling van parallelle injecties van loten in een pijplijn. Deze loten werden geïnjecteerd bij twee olieraffinaderijen. De loten konden ontvangen worden door de tweede olieraffinaderij en de drie distributiecentra. De tweede olieraffinaderij kon dus zowel olieproducten injecteren als ontvangen. Dit model kan uitgebreid worden naar complexere modellen zoals een boomstructuur

Tabel 2: Opsomming van publicaties omtrent scheduling

Auteurs	Type product	Formulatie	Tijdsrepresentatie	Benadering
Hane & Ratliff (1995)	Olieproducten	MILP	Discreet	Decompositie
Shah (1996)	Aardolie	MILP	Discreet	Decompositie
Pinto & Joly (2000)	Aardolie	MILP/MINLP	Discreet/continu	Single model
Magalhaes & Shah (2003)	Aardolie	MILP	Continu	Single model
Jia & Ierapetritou (2003)	Olieproducten	MILP	Continu	Decompositie
Rejowski & Pinto (2003)	Olieproducten	MILP	Discreet	Single model
Rejowski & Pinto (2004)	Olieproducten	MILP	Discreet	Single model
Cafaro & Cerdá (2004)	Olieproducten	MILP	Continu	Single model
Magatão et al. (2004)	Olieproducten	MILP	Discreet	Decompositie
Moro en Pinto (2004)	Aardolie (opslag)	MILP/MINLP	Continu	Single model
Magatão et al. (2005)	Olieproducten	MILP	Discreet	Decompositie
Relvas et al. (2006)	Olieproducten	MILP	Continu	Single model en decompositie
Relvas et al. (2007)	Olieproducten	MILP	Continu	Single model en decompositie
Neves-Jr. et al (2007)	Olieproducten	MILP	Continu	Decompositie
Rejowski & Pinto (2008)	Olieproducten	MINLP	Discreet/continu	Single model
Cafaro & Cerdá (2008)	Olieproducten	MILP	Continu	Single model
Mirhassani & Ghorbanalizadeh (2008)	Olieproducten	MIP (niet verduidelijkt)	Discreet	Single model
Karappiah et al. (2008)	Aardolie	MINLP/MILP	Continu	Decompositie
Relvas et al. (2009)	Olieproducten	MILP	Continu	Decompositie

Cafaro & Cerdá (2009)	Olieproducten	MILP	Continu	Single model
Herrán et al. (2010)	Olieproducten	MILP	Discreet	Single model
Boschetto et al. (2010)	Olieproducten	MILP	Continu	Decompositie
Cafaro et al. (2011)	Olieproducten	MILP	Discreet/continu	Decompositie
Mirhassani & Jahromi (2011)	Olieproducten	MILP	Continu	Single model
Cafaro et al. (2012)	Olieproducten	MILP	Continu	Single model
Relvas et al. (2013)	Olieproducten	MILP	Discreet	Single model
Mirhassani & Beheshtiasl (2013)	Olieproducten	MILP	Discreet	Single model
De Souza Filho et al. (2013)	Olieproducten	MILP	Discreet	Decompositie
Cafaro et al. (2015)	Olieproducten	MILP	Continu	Single model

HOOFDSTUK 3: PRAKTIJKSTUDIE

3.1 Vereiste wiskundige beperkingen om een schedule op te stellen

De praktijkstudie is gebaseerd op de wiskundige beperkingen uit het artikel van Relvas et al. (2006), die op hun beurt een deel van hun beperkingen hebben gebaseerd op het artikel van Cafaro en Cerdá (2004). Het artikel van Relvas et al. (2006) was een pionierswerk omdat dit artikel een leemte opvulde in de literatuur. Het artikel combineerde het transport van olieproducten vanuit een olieraffinaderij via een pijplijn naar een distributiecentrum en het voorraadbeheer van deze olieproducten in het distributiecentrum.

Aangezien er getracht wordt om zelf een model te bouwen met behulp van het optimalisatieprogramma LINGO worden de beperkingen uit het artikel van Relvas et al. (2006) gebruikt als een houvast. In dit hoofdstuk zullen alle beperkingen uit het artikel van Relvas et al. (2006) die te maken hebben met de centrale onderzoeksvraag van de masterproef uitgebreid besproken worden. In het volgend hoofdstuk zal er een selectie worden gemaakt van deze beperkingen. Dit wordt gedaan omwille van praktische redenen.

Relvas et al. (2006) maakten gebruik van een MILP model dat de continue tijds- en volumerepresentatie toepaste.

3.1.1 Nomenclature

Symbool

Indices/sets

Indices/sets	Beschrijving
$i \in I$	Loten
$p \in P$	Producten
$lt \in LT$	Lotvolumes
$k \in K$	Dagen
$I \supset I^{new}$	Loten die gepompt worden gedurende de tijdshorizon

Parameters

Parameters	Beschrijving
h_{max}	Tijdshorizon waarbinnen de bestelling volledig gepompt moet zijn (u)
vb	Debiet (m^3/u)
D_{max}	Maximum volume van elk lot (i) dat mag gelost worden in het distributiecentrum (m^3)
D_{min}	Minimum volume van elk lot (i) dat moet gelost worden in het distributiecentrum (m^3)
σ	Volumetric coordinate van het distributiecentrum (m^3)

M_{vol}	Groot getal, gerelateerd aan het pijplijnvolume
SS_{min}	Minimum veiligheidsvoorraad voor elk olieproduct (p) in het distributiecentrum
$ID_{max,p}$	Maximum opslagcapaciteit voor elk olieproduct (p) in het distributiecentrum
W_{o_i}	Volume van één of meerdere loten uit de vorige bestelling die nog aanwezig zijn in de pijplijn tijdens het starten van het pompen van de nieuwe bestelling
$TDem_k$	Discrete tijdsschaal die gebaseerd is op dagelijkse klantenvraag (u)
$lots_{p,lt}$	Matrix van mogelijke lotvolumes (lt) voor elk olieproduct (p)
$Dem_{p,k}$	Klantenvraag naar elk olieproduct (p) voor elke dag (k)
$sequence_{p,p'}$	Matrix van mogelijke volgordes tussen opéénvolgende olieproducten (p) en (p') in de pijplijn

Continue variabelen

Beschrijving

C_i	Tijdstip waarop een bepaald lot (i) volledig gepompt is (u)
L_i	Lengte pompen lot (i) (u)
Q_i	Volume van lot (i) (m ³)
$F_i^{i'}$	Upper volumetric coordinate van lot (i) op het tijdstip waarop een later lot (i') volledig gepompt is
$W_i^{i'}$	Volumetrische fractie van lot (i) dat nog in de pijplijn zit op het tijdstip op het tijdstip waarop een later lot (i') volledig gepompt is
$D_i^{i'}$	Volumetrische fractie van lot (i) gelost in het distributiecentrum op het tijdstip waarop een later lot (i') volledig gepompt is
qd_p^i is	Vraag naar olieproduct (p) op het tijdstip waarop een lot (i) volledig gepompt is
$DV_{i,p}^{i'}$	Volumetrische fractie van lot (i) van olieproduct (p) gelost in het distributiecentrum op het tijdstip waarop een later lot (i') volledig gepompt is
$ID_{total,p}^i$	Totale voorraad van olieproduct (p) beschikbaar in het distributiecentrum op het tijdstip waarop een later lot (i) volledig gepompt is

Binaire variabelen	Beschrijving
$y_{i,p}$	Geeft aan dat lot (i) een olieproduct (p) bevat, indien het gelijk is aan één
$x_i^{i'}$	Geeft aan dat er een fractie van lot (i) gelost kan worden in het distributiecentrum op het moment dat een later lot (i') volledig gepompt is, indien het gelijk is aan één
$ls_{i,p,lt}$	Geeft aan dat lot (i) het lotvolume (lt) van olieproduct (p) bevat, indien het gelijk is aan één
$dme_{i,k}$	Geeft aan dat de middernacht (het laatste moment) van dag (k) valt in het tijdsinterval $[0, C_i]$, indien het gelijk is aan één
$dm_{i,k}^{final}$	Geeft aan dat de middernacht van dag (k) valt in het tijdsinterval $[C_{i-1}, C_i]$, indien het gelijk is aan één

3.1.2 Basismodel

Verschillende modelbependingen die het transport van olieproducten vanuit één olieraffinaderij via één multi-product pijplijn naar één distributiecentrum dat beschikt over meerdere opslag tanks, én het voorraadbeheer in het distributiecentrum, beschrijft, worden hieronder opgesomd en toegelicht.

1. Volgorde van de loten

Het pompen van lot (i) mag niet starten voordat het pompen van het vorige lot (i-1) gedaan is:

$$C_i - L_i \geq C_{i-1} \quad \forall i \in I^{new} \quad (1)$$

(C_i) staat voor de completion time van lot (i), of met andere woorden het tijdstip waarop het pompen van dit lot (i) gedaan is. (C_i) wordt berekend door de som te nemen van de tijd dat het pompen van lot (i) geduurd heeft, opgeteld bij de totale de tijd die nodig is geweest om de vorige loten van dezelfde bestelling te pompen. (L_i) staat vervolgens voor de tijd dat het pompen van een bepaald lot (i) geduurd heeft. (C_i) en (L_i) worden beiden uitgedrukt in uren.

Daarnaast moet de tijd dat het pompen van lot (i) in beslag neemt altijd kleiner of gelijk zijn aan de completion time van het pompen van datzelfde lot (i):

$$L_i \leq C_i \quad \forall i \in I^{new} \quad (2)$$

Verder is het nodig dat alle toegewezen loten klaar zijn met pompen binnen de opgelegde tijdshorizon. Dit wil dus niet zeggen dat de laatste gepompte loten ook effectief voor de tijdshorizon in het distributiecentrum moeten worden geleverd.

$$C_i \leq h_{max} \quad \forall i \in I^{new} \quad (3)$$

(h_{max}) staat voor de maximum tijd, uitgedrukt in uren, waarvoor het laatste lot van een bepaalde bestelling klaar moet zijn met pompen.

2. Relatie tussen het lotvolume en de pomptijd

Door het gebruik van een constant debiet (vb), kan de relatie tussen het volume van een bepaald lot (i), namelijk (Q_i), en de duur van het pompen van lot (i), namelijk (L_i), gegeven worden door de volgende vergelijking:

$$Q_i = vb \times L_i \quad \forall i \in I^{new} \quad (4)$$

3. Olieproducten die elkaar niet mogen opvolgen

Voor het garanderen van een goede kwaliteit van olieproducten aan de klant, zijn sommige productvolgordes tijdens het transporteren van de olieproducten doorheen een pijplijn verboden. De toegelaten en verboden productvolgordes worden beschreven in de volgordematrix ($sequence_{p,p'}$). Indien olieproduct (p) gevolgd mag worden door een ander type van olieproduct (p') dan is de parameter ($sequence_{p,p'}$) gelijk aan één. In het andere geval is de parameter ($sequence_{p,p'}$) gelijk aan nul.

$$y_{i-1,p} + y_{i,p'} \leq 1 + sequence_{p,p'} \quad \forall i \in I^{new}, \forall p, p' \in P \quad (5)$$

$(y_{i-1,p})$ is een binaire variabele die staat voor de allocatie van olieproduct (p) aan het vorige lot ($i-1$). $(y_{i,p'})$ is eveneens een binaire variabele die staat voor de allocatie van een ander type van olieproduct (p') aan lot (i).

4. Het eerste en laatste coördinaat van een lot

Elke gebeurtenis die zich tijdens het pompen van de olieproducten voordoet, uitgezonderd de completion time van elk lot, moet worden gerapporteerd. Een voorbeeld kan zijn dat de pompen om één of andere reden worden stilgelegd.

$(F_i^{i'})$, staat voor de upper volumetric coordinate van lot (i) in de pijplijn op het moment dat een later lot (i') gestopt is met pompen, dus op het moment van de completion time ($C_{i'}$).

$(W_i^{i'})$ vervolgens staat voor volumetrische fractie of het hele volume van lot (i) dat zich nog steeds in de pijplijn bevindt op het moment dat een later lot (i') gestopt is met pompen, dus op het moment van de completion time ($C_{i'}$). De lower volumetric coordinate van lot (i) is vervolgens gelijk aan de upper volumetric coordinate van het volgende lot ($i+1$):

$$F_{i+1}^{i'} + W_i^{i'} = F_i^{i'} \quad \forall i \in I, \forall i' \in I^{new}, i' > i \quad (6)$$

5. Activiteiten op het einde van de pijplijn

Wanneer een bepaald lot (i) op het einde van de pijplijn arriveert dan kunnen er zich twee verschillende situaties voordoen. De eerste situatie is het gegeven dat hetzelfde lot (i) nog steeds in de pijplijn wordt geïnjecteerd. In de tweede situatie wordt er al een later lot (i') geïnjecteerd.

Indien de eerste situatie toepasbaar is, dan is de som van het totale volume van lot (i) in de pijplijn op het moment van de completion time (C_i) van hetzelfde lot (i) namelijk (W_i^i), en het volume van lot (i) gelost in het distributiecentrum, namelijk (D_i^i), op het moment van de completion time (C_i) van lot (i) gelijk aan het volume van het lot (i), namelijk (Q_i):

$$Q_i = W_i^i + D_i^i \quad \forall i \in I^{new} \quad (7)$$

In deze specifieke situatie is de upper volumetric coordinate van lot (i) hetzelfde als die van het totale volume van lot (i) dat zich in de pijplijn bevindt:

$$F_i^i = W_i^i \quad \forall i \in I^{new} \quad (8)$$

De tweede situatie zal echter vaker voorkomen dan de eerste situatie. In deze situatie, moet naar het volume van lot (i) dat gelost wordt in het distributiecentrum verwezen worden met ($D_i^{i'}$) en wordt verkregen door:

$$W_i^{i'} = W_i^{i'-1} - D_i^{i'} \quad \forall i \in I, \forall i' \in I^{new}, i' > i \quad (9)$$

Het is vervolgens nodig om na te gaan wanneer het mogelijk is om te starten met het lossen van een lot (i) in het distributiecentrum. Dit wordt gedaan met behulp van vier beperkingen die hieronder worden opgesomd (10) – (13). Als een lot (i) kan worden gelost in het distributiecentrum tegen de tijd dat een later lot (i') gedaan is met pompen, wordt het geassocieerde geloste volume weergegeven door ($D_i^{i'}$):

$$D_i^{i'} \leq D_{max} x_i^{i'} \quad \forall i \in I, \forall i' \in I^{new}, i' > i \quad (10)$$

($x_i^{i'}$) staat voor de binaire beslissingsvariabele die beslist of er al dan niet mag gelost worden in het distributiecentrum. (D_{max}) is de parameter die het maximum dat er mag gelost worden van ($D_i^{i'}$) bepaalt. (D_{max}) is gelijk aan de het grootste lotvolume van alle olieproducten die er gepompt zullen worden. Dit is één getal en is op voorhand geweten.

Aan de andere kant is de upper volumetric coordinate van lot (i), namelijk ($F_i^{i'}$), kleiner of gelijk aan de volumetric coordinate die het distributiecentrum representeert, namelijk (σ), tenzij het wordt gelost. De (σ) is gelijk aan de maximum capaciteit van de pijplijn. Hieronder staat dus dat ($F_i^{i'}$) altijd groter of gelijk is aan nul tenzij het lot (i) wordt gelost dan is ($F_i^{i'}$) gelijk aan (σ).

$$F_i^{i'} \geq \sigma \times x_i^{i'} \quad \forall i \in I, \forall i' \in I^{new}, i' > i \quad (11)$$

De volgende beperking verbetert de omschrijving van het lossen van olieproducten waardoor het model betere resultaten oplevert:

$$F_{i+1}^{i'-1} \leq \sigma - D_i^{i'} + (1 - x_i^{i'})M_{vol} \quad \forall i \in I, \forall i' \in I^{new}, i' > i \quad (12)$$

De derde term aan de rechterzijde $(1 - x_i^{i'})M_{vol}$ is echter overbodig in een systeem met maar één distributiecentrum. Echter omdat het bijdraagt tot een betere berekening van de oplossing, zal dit voor toekomstig werk behouden worden. In dit model zal het dus niet gebruikt worden.

Voorts, om de nulwaarden van de binaire beslissingsvariabele $(x_i^{i'})$ af te dwingen indien er geen fractie van lot (i) in de pijplijn zit, is de volgende beperking geformuleerd:

$$W_i^{i'-1} \geq D_{min}x_i^{i'} \quad \forall i \in I, \forall i' \in I^{new}, i' > i \quad (13)$$

(D_{min}) is de parameter die het minimum dat er moet gelost worden van $(D_i^{i'})$ bepaalt.

Ten slotte wordt elk volume van lot (i) dat gelost wordt in het distributiecentrum, namelijk $(D_i^{i'})$, gelimiteerd door het volume van lot (i) dat in het vorige tijdsinterval $[C_{i'-2}, C_{i'-1}]$ nog steeds in de pijplijn aanwezig is, namelijk $W_i^{i'-1}$:

$$D_i^{i'} \leq W_i^{i'-1} \quad \forall i \in I, \forall i' \in I^{new}, i' > i \quad (14)$$

6. Allocatie van een olieproduct aan een lot

Elk lot (i) bevat maximum één olieproduct (p):

$$\sum_{p \in P} y_{i,p} \leq 1 \quad \forall i \in I^{new} \quad (15)$$

Als er geen olieproduct is toegewezen aan een lot, betekent dit dat het lot fictief is en daarom geplaatst moet worden op het einde van de volgorde van de loten. Hierdoor kan dit fictief lot het finale schema niet beïnvloeden:

$$\sum_{p \in P} y_{i,p} \leq \sum_{p \in P} y_{i-1,p} \quad \forall i \in I^{new} \quad (16)$$

Als men wenst te werken met een vast aantal loten en/of een gemixte volgorde van olieproducten, kunnen de vorige twee beperkingen (15) en (16) worden vervangen door de volgende beperking:

$$\sum_p y_{i,p} = 1 \quad \forall i \in I^{new} \quad (17)$$

Voorts kan bovenstaande beperking (17) verwijderd worden indien een vaste volgorde van olieproducten op voorhand wordt vastgelegd. Het optimalisatieprogramma is dan verplicht deze volgorde te gebruiken.

7. Keuze van lotvolumes

Opslagtanks in het distributiecentrum kunnen zich in drie toestanden bevinden. Ofwel is de pijplijn gekoppeld aan de opslagtank en wordt deze opslagtank gevuld tot de maximumcapaciteit. Ofwel zijn de opslagtanks al gevuld tot de maximumcapaciteit en zijn deze opslagtanks aan het settelen. Ofwel worden de olieproducten uit de opslagtank die voldoende gesetteld zijn, overgepompt naar tankwagens voor distributie naar klanten toe. Elk lot (i) zal dan bijgevolg één van de mogelijke lotvolumes (lt) die overeenkomen met de opslagcapaciteit van de opslagtanks van elk type van olieproduct (p) aannemen.

$$\sum_{lt \in LT} ls_{i,p,lt} = y_{i,p} \quad \forall i \in I^{new}, p \in P \quad (18)$$

$(ls_{i,p,lt})$ is een gedisaggregeerde binaire beslissingsvariabele van $(y_{i,p})$ dat het lotvolume (lt) kiest. Een bepaald lot (i) heeft lotvolume (lt) van olieproduct (p) indien $(ls_{i,p,lt})$ gelijk is aan één.

Het volume van lot (i), namelijk (Q_i) , wordt dan berekend door:

$$Q_i = \sum_{p \in P} \sum_{lt \in LT} (ls_{i,p,lt} lots_{p,lt}) \quad \forall i \in I^{new} \quad (19)$$

Waarvan $(lots_{p,lt})$ de parameter is voor alle mogelijke lotvolumes per olieproduct (p). Dit zijn er meestal twee à drie per olieproduct. Deze formule zal ook de berekening van de pomptijd van lot (i) beschreven in vergelijking (4) afdwingen.

8. Het evenwicht in de pijplijn tijdens het injecteren van een later lot

Omdat de gebeurtenis die beschouwd wordt om een continue tijdsschaal te genereren het pompen van elk lot (i), in elk interval is, wordt het evenwichtsvolume tussen de pijplijneindes volbracht door het totale volume van de fracties van lot (i) gelost in het huidige tijdsinterval en het volume van lot $i' \geq i$ gepompt in dat interval:

$$\sum_{i \in I, i \leq i'} D_i^{i'} = Q_{i'} \quad \forall i' \in I^{new} \quad (20)$$

Bovenstaande beperking betekent dat het volume van een later lot (i') gelijk is aan de som van alle fracties van één of meerdere vorige loten (i) die gelost werden tijdens het pompen van het later lot (i').

9. Initiële pijplijncondities

Parameter (W_{0i}) duidt het volume aan van de loten (i) die zich al in de pijplijn bevinden in het begin van de tijdshorizon. Dit zijn dus loten van de vorige bestelling. Deze loten zorgen ervoor dat het model opgestart kan worden:

$$W_i^{i'-1} = W_{0i} \quad \forall i \notin I^{new}, i' = first(I^{new}) \quad (21)$$

Bovenstaande conditie is enkel geldig voor het pompen van lot (i') zodat dat lot het eerste lot is van de huidige bestelling dat wordt gepompt.

10. Voorraadbeheer in het distributiecentrum

Bovenstaande secties behandelden de pijplijnactiviteiten waarin schedulen de hoofdzaak is. Nadat een lot (i) echter het einde van de pijplijn bereikt, moet het olieproduct dat in dat lot (i) zit ook worden geïdentificeerd en vervolgens gelost worden in de juiste opslagtanks. Het systeem weet eigenlijk pas op het moment dat een lot (i) gelost wordt over welk olieproduct (p) het precies gaat. Om de olieproducten te identificeren, zijn de volgende twee beperkingen geschreven:

$$DV_{i,p}^{i'} \leq D_{max} y_{i,p} \quad \forall i \in I, i' \in I^{new}, p \in P, i' \geq i \quad (22)$$

$$\sum_{p \in P} DV_{i,p}^{i'} = D_i^{i'} \quad \forall i \in I, i' \in I^{new}, i' \geq i \quad (23)$$

De continue variabele ($DV_{i,p}^{i'}$) geeft een fractie van het volume van lot (i) van olieproduct (p) dat gelost wordt in het distributiecentrum op het moment van de completion time ($C_{i'}$) van een later lot (i'). ($DV_{i,p}^{i'}$) wordt berekend met behulp van de twee bovenstaande beperkingen.

De restricties beschreven in (22) zijn beperkt tot maximum één niet nulwaarde in (p) voor variabele ($DV_{i,p}^{i'}$) en verder is er een maximum (D_{max}) voor deze variabele. Daarnaast verplicht de beperking geschreven door (23) dat de som van de niet nul variabele ($DV_{i,p}^{i'}$) dezelfde waarde aanneemt als de geaggregeerde overeenkomstige variabele ($D_i^{i'}$).

Verder wordt de voorraadcontrole gedaan door een evenwichtsvolume voor elk opslagtank, in elk tijdsinterval:

$$ID_{total,p}^{i'} = ID_{total,p}^{i'-1} + \sum_{i \in I, i \leq i'} DV_{i,p}^{i'} - qd_p^{i'} \quad p \in P, i' \in I^{new} \quad (24)$$

Conditie (24) staat voor de update van de voorraad van olieproduct (p) voor de loten (i), gelost in het distributiecentrum, namelijk $(DV_{i,p}^{i'})$, in dat interval, en de vraag van de klanten (qd_p^i) .

$ID_{total,p}^{i'}$ staat voor de voorraad van olieproduct (p) aanwezig in het distributiecentrum op het moment van de completion time $(C_{i'})$ van een later lot (i'). De beginvoorraden $(ID_{total,p}^{i'-1})$, met $i' = (first(I^{new}))$ moet voorzien worden in het model. De som van $(DV_{i,p}^{i'})$ berekent hoeveel er gelost werd in het distributiecentrum en (qd_p^i) staat voor de vraag van klanten naar olieproduct (p) op het moment van de completion time $(C_{i'})$ van een later lot (i').

Onderstaande beperking (25) legt de maximum opslagcapaciteit voor elk type van olieproduct op. Dit wordt gedaan door parameter $(ID_{max,p})$:

$$ID_{total,p}^{i'} \leq ID_{max,p} \quad p \in P, i' \in I^{new} \quad (25)$$

Bovendien kunnen sommige operationele beperkingen ook opgenomen worden als er een minimum veiligheidsvoorraad (SS_{min}) moet worden gegarandeerd. Deze beperking is echter optioneel, maar kan een zeer bepalende beperking in het voorraadbeheer zijn:

$$ID_{total,p}^{i'} \geq SS_{min} ID_{max,p} \quad p \in P, i' \in I^{new} \quad (26)$$

11. Klantenvraag

De discrete dagelijkse vraag van klanten wordt omgezet naar een continue vraag. Dit wordt gedaan door twee beslissingsvariabelen: de positievariabele $(dme_{i,k})$ en de gebeurtenisvariabele $(dm_{i,k}^{Final})$. De positievariabele geeft aan of de middernacht van dag (k) voor de completion time (C_i) valt. Dit wordt berekend door de volgende twee beperkingen:

$$C_i \geq TDem_k dme_{i,k} \quad \forall i \in I^{new}, k \in K \quad (27)$$

$$C_i \leq TDem_k + h_{max} dme_{i,k} \quad \forall i \in I^{new}, k \in K \quad (28)$$

$(TDem_k)$ staat voor de discrete tijdsschaal met een intervallengte van één dag. De discontinuïteit van de positievariabele $(dme_{i,k})$ laat de berekening van de gebeurtenisvariabele toe.

Om bovenstaande twee vergelijkingen beter te begrijpen, worden deze vergelijkingen uitgelegd aan de hand van een voorbeeld. De completion time wordt in dit voorbeeld uitgedrukt in dagen. Dit is gedaan om het duidelijker uit te leggen. In het tweede hoofdstuk van de praktijkstudie zal er voorbeeld worden opgelost waarin de completion time wordt uitgedrukt in uren.

Stel dat de completion time van lot één, namelijk (C_1), gelijk is aan 3,5 dagen. De parameters zijn: $TDem_1 = 1, \dots, TDem_4 = 4$. Voor beperking (27) geldt dan het volgende:

$$C_1 \geq 1 * dme_{1,1}$$

$$C_1 \geq 2 * dme_{1,2}$$

$$C_1 \geq 3 * dme_{1,3}$$

$$C_1 \geq 4 * dme_{1,4}$$

In het eerste geval kan de binaire variabele $dme_{1,1}$ die staat voor lot één en dag één, de waarde nul of één aannemen zodat de vergelijking klopt. In het tweede geval kan $dme_{1,2}$ ook de waarde nul of één aannemen. In het derde geval kan $dme_{1,3}$ eveneens de waarde nul of één aannemen. In het vierde geval daarentegen kan $dme_{1,4}$ enkel de waarde nul aannemen.

Dezelfde werkwijze wordt toegepast voor beperking (28). $dme_{1,1}$, $dme_{1,2}$ en $dme_{1,3}$ kunnen enkel de waarde één aannemen in tegenstelling tot $dme_{1,4}$ die de waarde nul of één kan aannemen.

Indien we beperkingen (27) en (28) dus samen bekijken is het duidelijk dat $dme_{1,1}$, $dme_{1,2}$ en $dme_{1,3}$ alle drie de waarde één moeten aannemen en $dme_{1,4}$ de waarde nul.

$$dm_{i,k}^{Final} = dme_{i,k} - dme_{i-1,k} \quad \forall i \in I^{new}, k \in K \quad (29)$$

$(dm_{i,k}^{Final})$ is een binaire variabele die aangeeft of de middernacht (het laatste moment) van een bepaalde dag (k), al dan niet in het tijdsinterval $[C_{i-1}, C_i]$ valt. $(dme_{i,k})$ is ook een binaire variabele, maar deze geeft aan of de middernacht van een bepaalde dag (k) al dan niet in het tijdsinterval $[0, C_i]$ valt.

De continue informatie over de vraag van klanten naar olieproducten (qd_p^i) wordt vervolgens berekend door het gebruik van de passende variabele tussen discrete en continue tijdschalen, zoals beschreven door onderstaande formule:

$$qd_p^i = \sum_{k \in K} Dem_{p,k} dm_{i,k}^{Final} \quad \forall i \in I^{new}, p \in P \quad (30)$$

$(Dem_{p,k})$ is een parameter die staat voor de discrete dagelijkse vraag van klanten naar olieproducten.

12. Hulpbeperkingen

Om de prestaties van het model te verbeteren worden enkele hulpbeperkingen gedefinieerd. Dit zijn in feite opeenvolgende beperkingen die worden toegepast op de pijplijnactiviteiten. Ze brengen het totale volume van de pijplijn in kaart.

Onderstaande voorwaarde (31) verplicht de upper volumetric coordinate variabele ($F_i^{i'}$) om sequentieel te zijn voor hetzelfde lot:

$$F_i^{i'} \geq F_i^{i'-1} \quad \forall i \in I, \forall i' \in I^{new}, i' > i \quad (31)$$

Dezelfde assumptie wordt gemaakt voor de lower volumetric coordinate ($F_i^{i'} - W_i^{i'}$):

$$F_i^{i'} - W_i^{i'} \geq F_i^{i'-1} - W_i^{i'-1} \quad \forall i \in I, \forall i' \in I^{new}, i' > i \quad (32)$$

Een andere beperking kan toegevoegd worden die als een maximum waarde voor het huidige volume van lot (i) in de pijplijn ($W_i^{i'}$), de upper volumetric coordinate van lot (i) gebruikt:

$$F_i^{i'} \geq W_i^{i'} \quad \forall i \in I, \forall i' \in I^{new}, i' > i \quad (33)$$

$$\sum_{i \in I, i \leq i'} D_i^{i'} = \sum_{p \in P} \sum_{lt \in LT} (ls_{i',p,lt} \cdot lots_{p,lt}) \quad \forall i' \in I^{new} \quad (34)$$

Ten slotte worden twee vergelijkingen geformuleerd die helpen met de bepaling van de waarde van de gebeurtenisvariabele ($dm_{i,k}^{Final}$):

$$\sum_{i \in I^{new}} dm_{i,k}^{Final} = 1 \quad k \in K \quad (35)$$

Conditie (35) geeft aan dat ($dm_{i,k}^{Final}$) maar in één tijdsinterval kan liggen. Deze gebeurtenisvariabele ligt met andere woorden tussen twee completion times.

$$\sum_{i'=first(I^{new})}^{i' \leq i} dm_{i',k}^{Final} \leq \sum_{i'=first(I^{new})}^{i' \leq i} dm_{i',k-1}^{Final} \quad \forall i \in I^{new}, k \in K, k > 1 \quad (36)$$

Daartegenover dwingt de beperking beschreven door (36) af om een geordende volgorde om dagen te alloceren in de continue tijdsschaal.

13. Doelfunctie

De doelfunctie kan operationeel of economisch georiënteerd zijn. De oriëntatie die vaak gebruikt wordt in eerder publicaties is die van de economische oriëntatie. In het bedrijfsleven echter wordt de operationele doelfunctie vaak gebruikt. Omwille van die reden wordt er in dit geval ook gekozen voor de operationele doelfunctie. Deze doelfunctie wordt bovendien gemaximaliseerd (**Relvas et al., 2006**).

$$\text{Max} \frac{\sum_{i \in I^{New}} L_i}{h_{max}} + \frac{\sum_{i \in I^{New}} Q_i}{h_{max} v b} + \frac{\sum_{p \in P} (ID_{i,p} / ID_{max,p})}{P}$$

De eerste term maximaliseert de totale werktijd van de pijplijn. De tweede term maximaliseert het volume van olieproducten dat wordt getransporteerd. De derde term maximaliseert de voorraad op het einde van de tijdshorizon.

3.2 Ontwikkeling model in LINGO

Het opzet van dit hoofdstuk is om zelf een model te ontwikkelen voor het transport en voorraadbeheer van olieproducten. Dit wordt gerealiseerd met behulp van het optimalisatieprogramma LINGO. Zoals eerder vermeld, wordt er gebruik gemaakt van de beperkingen en gegevens uit het artikel van Relvas et al. (2006). Er wordt getracht om zoveel mogelijk beperkingen en gegevens uit het artikel over te nemen maar om praktische redenen worden sommige beperkingen achterwege gelaten. Het doel van dit hoofdstuk is om een correct functionerend model in LINGO te programmeren dat één of meerdere schedules voorstelt. Door achteraf een manuele berekening van de voorraad, die gebaseerd is op een discrete dagelijkse klantenvraag, te doen, wordt beslist welke schedule gebruikt zal worden. Daarnaast wordt geprobeerd om een automatische berekening van de voorraad, die gebaseerd is op een continue klantenvraag, te programmeren. De twee voorraadberekeningen zullen vergeleken worden.

Dit model kan later door geïnteresseerden worden overgenomen en uitgebreid. Het model uitbreiden met onder andere meer olieproducten, meer loten en een langere tijdshorizon vormt geen probleem maar het zal wel een meer dan lineair langere berekeningstijd van LINGO vereisen. Het model kan voorts ook uitgebreid worden met beperkingen die hierboven besproken zijn maar niet opgenomen zijn in dit model.

3.2.1 Gemaakte assumpties

Zoals eerder gesuggereerd, worden er enkele assumpties gemaakt.

Niet overgenomen uit het artikel

1. De beperkingen (31) tot en met (34) worden niet opgenomen. Dit zijn hulpbeperkingen die kunnen gebruikt worden door LINGO om sneller tot een resultaat te komen. Deze hulpbeperkingen zijn in dit model overbodig.
2. Beperkingen (15) en (16) worden niet gebruikt aangezien er gewerkt wordt met een vast aantal loten waardoor enkel beperking (17) toegepast zal worden.

Deels overgenomen uit het artikel

1. Er worden drie in plaats van zes olieproducten getransporteerd. De reden hiervoor is om de berekeningstijd te reduceren. Indien het model correct werkt voor drie olieproducten, zal het ook correct werken voor zes olieproducten. De keuze om te bepalen welke drie olieproducten geselecteerd worden, is gebaseerd op twee zaken:

Van de drie olieproducten moeten er exact twee olieproducten zijn die niet voor of achter elkaar gepompt mogen worden. Daarnaast moet er een derde olieproduct gekozen worden dat wel voor of achter de twee andere olieproducten gepompt mag worden. Om deze drie olieproducten te selecteren, wordt gebruik gemaakt van de volgordematrix van Relvas et. al (2006). Er zijn twee opties.

De eerste optie is olieproduct één, olieproduct twee en olieproduct vier. Olieproduct vier mag voor en achter olieproduct twee en olieproduct vier gepompt worden. Olieproduct twee en olieproduct vier mogen niet voor of achter elkaar gepompt worden.

De tweede optie is olieproduct één, olieproduct twee en olieproduct drie. Olieproduct één mag voor en achter olieproduct twee en olieproduct drie gepompt worden. Olieproduct twee en olieproduct drie mogen niet voor of achter elkaar gepompt worden.

Daarnaast wordt er gekeken naar de maandelijkse klantenvraag per olieproduct. Er is een zeer grote vraag naar olieproduct één met 198043 m^3 , olieproduct twee heeft een middelgrote vraag van 64800 m^3 , olieproduct drie heeft een zeer lage vraag van 14642 m^3 , olieproduct vier heeft een middelgrote vraag van 68244 m^3 , olieproduct vijf heeft de laagste vraag met 10934 m^3 en olieproduct zes ten slotte heeft eveneens een zeer lage vraag van 16955 m^3 .

Aangezien er in het artikel van Relvas et al. (2006) voor een middellange termijn van 31 dagen wordt gescheduled voor een totale vraag van 373618 m^3 voor de zes olieproducten, en omdat er getracht wordt deze gegevens zo goed mogelijk te benaderen wordt er gekozen voor de drie olieproducten met de hoogste vraag. Dit zijn olieproduct één, olieproduct twee en olieproduct vier. De totale vraag voor deze drie olieproducten bedraagt 331087 m^3 .

Omdat de verhouding van de vraag van 373618 m^3 voor 31 dagen, omwille van de benuttingsgraad van de pompen, het liefst behouden wordt, wordt de totale vraag van de drie olieproducten, namelijk 331087 m^3 , herrekend naar het overeenstemmend aantal dagen. 331087 m^3 komt overeen met 27,47 dagen. Dit getal wordt vervolgens afgerond naar 28 dagen waardoor de totale vraag naar de drie olieproducten in dit basismodel 337461 m^3 is.

Indien dit vertaald wordt naar de vraag per dag bedraagt die voor olieproduct één 7209 m^3 , voor olieproduct twee 2361 m^3 en voor olieproduct vier 2483 m^3 . Voor 31 dagen zou de vraag 373618 m^3 bedragen voor de drie olieproducten in plaats van voor de zes olieproducten.

2. Relvas et al. (2006) starten met een volle pijplijn. Dit wil zeggen dat er nog één of meerdere loten van een vorige bestelling in de pijplijn zitten. Deze startconditie wordt in het basismodel achterwege gelaten wegens te veel complexe beperkingen die geformuleerd zouden moeten worden. Zo zou er voor iedere beperking telkens met twee soorten loten, één voor de oude en één voor de huidige bestelling, rekening gehouden moeten worden. Een nadeel is wel dat het distributiecentrum in dit basismodel twee dagen langer zal moeten wachten op de levering van het eerste volledige lot.

Er moet wel opgemerkt worden dat het starten met een lege pijplijn in de realiteit wel kan voorkomen. De bestelling kan de eerste bestelling zijn die via deze pijplijn gepompt wordt of er kunnen onderhoudswerken geweest zijn waardoor de pijplijn leeg is.

3. De lotvolumes die Relvas et al. (2006) per olieproduct toepasten, worden overgenomen op uitzondering van het derde lotvolume van olieproduct één namelijk 17300 m³. Deze wordt achterwege gelaten. Voor olieproduct één zullen de lotvolumes 21800 m³ en 18000 m³ bedragen, voor olieproduct twee 16000 m³ en 18000 m³ en voor olieproduct vier ten slotte 16000 m³ en 8000 m³. Het weglaten van het derde lotvolume van olieproduct één zal amper impact hebben.
4. Er wordt gestart met pompen van zodra de dag start, dus op tijdstip 00u01. In het model van Relvas et al. (2016) werd er pas gestart met pompen om 10u00.
5. De maximum opslagcapaciteit voor olieproduct één bedraagt in het artikel van Relvas et al. (2006) 81500 m³, die van olieproduct twee 32000 m³ en die van olieproduct vier 27800 m³. Aangezien er nu drie in plaats van zes producten gepompt worden en de vraag naar elk olieproduct ook proportioneel groter is, zal de maximum opslagcapaciteit aangepast worden. Er is gekozen om deze te verhogen met 15%. De nieuwe waarde voor olieproduct één is 93725 m³, voor olieproduct twee 36800 m³ en voor olieproduct vier 31970 m³.
6. In het artikel van Relvas et al. (2006) worden 35 loten gepompt in 31 dagen. In dit basismodel worden er zes loten gepompt voor een tijdshorizon van zeven dagen en tien loten voor een tijdshorizon van 14 dagen.

Overgenomen uit het artikel

1. Het debiet dat gepompt wordt, bedraagt 519 m³/uur.
2. De veiligheidsvoorraad voor de opslagtanks in het distributiecentrum bedraagt nul.
3. Het maximum volume dat gelost mag worden per lot in het distributiecentrum is gelijk aan het grootste lotvolume van de drie olieproducten die gekozen worden. Het maximum bedraagt 21800 m³.
4. De beginvoorraad in het distributiecentrum bedraagt 52397 m³ voor olieproduct één, 17565 m³ voor olieproduct twee en 19888 m³ voor olieproduct vier.
5. Er wordt geen gebruik gemaakt van plugs.
6. De pijplijn heeft een lengte van 147 kilometer en een volume van 18000 m³.
7. Het coördinaat van het distributiecentrum is hetzelfde getal als het volume van de pijplijn, namelijk 18000 m³.
8. De kans op een stoptijd is aanwezig. Dit is de tijd dat er niet gepompt wordt tijdens de tijdshorizon van een bestelling. Dit kan voorvallen indien de optimale toewijzing van de loten en lotvolumes bepaald is maar er toch nog een beetje ruimte is met betrekking tot de maximale tijdshorizon.
9. Het minimum dat er per lot gelost moet worden, bedraagt 35 m³.

3.2.2 Bespreking input

Model van zes loten, drie olieproducten en zeven dagen

Er wordt gestart met een eenvoudig model van zes loten, drie olieproducten en zeven dagen met een doelfunctie waarin de pomptijd gemaximaliseerd wordt. De geschreven input voor LINGO zal hieronder stap voor stap worden overlopen.

Het model bestaat telkens uit twee delen. Enerzijds is er het deel dat handelt over de 'DISCRETE KLANTENVRAAG'. De hoeveelheid input voor dit model is beperkt en de voorraad wordt achteraf manueel berekend op basis van de klantenvraag die iedere dag hetzelfde is. Anderzijds is er het deel dat handelt over de 'CONTINUE KLANTENVRAAG'. Dit deel gebruikt de input voor de discrete klantenvraag maar voegt hier input aan toe. De voorraad wordt daarnaast ook door het optimalisatieprogramma zelf berekend.

3.2.2.1 Sets

Er wordt gestart met het aanmaken van sets voor de variabelen

DISCRETE KLANTENVRAAG

- LOT /1..6/: COMPLETION_TIME, PUMPING_TIME , VOLUME_LOT;

Definieert het aantal loten, de eindtijd, de pomptijd en het lotvolume.

- PRODUCT/1..3/;

Definieert het aantal olieproducten.

- SEQUENCE_ALLOWED (PRODUCT,PRODUCT): MATCH;
- PRODUCTION_SEQUENCE (LOT,PRODUCT): ALLOCATION, LS1, LS2:

Worden gebruikt om te bepalen welke olieproducten achter elkaar gepompt mogen worden. De 'MATCH' wordt verderop gedefinieerd (zie sectie Data). De allocatie, en de binaire variabelen LS1 en LS2 zijn afhankelijk van een bepaald lot een bepaald olieproduct.

- DISCHARGED (LOT, LOT): DIS;

Definieert het volume van een lot dat gelost kan worden in het distributiecentrum.

- VOL_LOTS /1..2/;

Elk olieproduct heeft twee verschillende lotvolumes die kunnen worden aangeproken.

- LOTS (PRODUCT, VOL_LOTS): MATCH_LOTS;

Wordt gebruikt om een bepaald lotvolume te koppelen aan een olieproduct. De 'MATCH_LOTS' wordt verderop gedefinieerd (zie sectie Data).

- FRACTION_DISCHARGED (LOT, LOT, PRODUCT): DV;

Definieert het volume van een lot dat gelost kan worden in het distributiecentrum. Het verschil tussen DIS en DV wordt verderop in dit hoofdstuk besproken.

- DAY/1..7/;

Wordt gebruikt in DEMAND_DAY (zie hieronder).

- DEMAND_DAY(PRODUCT, DAY): DEM;

Staat voor de discrete vraag van de consument naar de drie olieproducten per dag. De 'DEM' wordt verderop gedefinieerd (zie sectie Data).

CONTINUE KLANTENVRAAG

- PRODUCT/1..3/: BV_DC;

'PRODUCT/1..3/' werd al opgenomen maar nu wordt BV_DC eraan toegevoegd. Dit is de beginvoorraad van elk olieproduct in het distributiecentrum. De 'BV_DC' wordt verderop gedefinieerd (zie sectie Data).

- TOTAL_OF_EACH_PRODUCT_IN_DC (PRODUCT, LOT): ID;

Definieert de voorraad die van elk olieproduct in het distributiecentrum aanwezig is. De 'ID' wordt verderop gedefinieerd (zie sectie Data).

- DEMAND_PRODUCT (PRODUCT, LOT): QD;

Definieert de continue klantenvraag voor elk olieproduct.

- DAY_IN_INTERVAL (LOT, DAY): DME, DMFINAL;

Definieert de positievariabele en de gebeurtenisvariabele die worden gebruikt voor de berekening van de continue klantenvraag.

- MAX_STORAGE_DC (PRODUCT): IDMAX;

Bepaalt de maximum opslagcapaciteit in het distributiecentrum per type van olieproduct. De 'IDMAX' wordt verderop gedefinieerd (zie sectie Data).

3.2.2.2 Data

Na de sets volgt de data.

DISCRETE KLANTENVRAAG

- HMAX = 168;

De maximale tijdshorizon uitgedrukt in uren. Binnen deze tijd moeten alle loten van de bestelling volledig gepompt zijn.

- FLOW_RATE = 519;

Het debiet, uitgedrukt in aantal kubieke meter per uur, dat gepompt wordt. Deze waarde blijft in dit model constant.

- MATCH = 0 1 1
1 0 0
1 0 0 ;

Deze matrix geeft aan welke olieproducten elkaar mogen opvolgen. Uit deze matrix kan afgeleid worden dat dezelfde olieproducten elkaar niet mogen opvolgen en dat bijvoorbeeld olieproduct twee en olieproduct vier niet achter elkaar gepompt mogen worden.

- DMAX = 21800;

Het maximum volume, uitgedrukt in aantal kubieke meter, dat gelost mag worden in het distributiecentrum. Het maximum volume is gelijk aan de waarde van het grootste lotvolume dat gekozen kan worden.

- MATCH_LOTS = 21800 18000
16000 8000
16000 8000 ;

In deze matrix gebeurt de toewijzing van de lotvolumes aan de olieproducten. Voor een lot dat olieproduct één bevat, kan gekozen worden uit een lotvolume van 21800 m³ of 18000 m³.

- DEM = 7209 7209 7209 7209 7209 7209 7209
2361 2361 2361 2361 2361 2361 2361
2483 2483 2483 2483 2483 2483 2483

Deze matrix geeft de vraag per olieproduct voor zeven dagen weer. De eerste rij staat voor olieproduct één, de tweede rij voor olieproduct twee en de derde rij voor olieproduct vier.

CONTINUE KLANTENVRAAG

- IDMAX = 81500 32000 27800;

De maximum opslagcapaciteit in het distributiecentrum voor olieproduct één, olieproduct twee en olieproduct vier.

- BV_DC = 52397 17565 19888;

De beginvoorraad in het distributiecentrum voor olieproduct één, olieproduct twee en olieproduct vier.

- SSMIN = 0;

Het percentage van de voorraad dat in het distributiecentrum voor elk type van olieproduct als veiligheidsvoorraad moet worden aangehouden. Deze bedraagt nul.

3.2.2.3 Doelfunctie

Na het definiëren van de 'sets' en het toevoegen van de 'data' volgt de doelfunctie en de beperkingen.

DISCRETE EN CONTINUE KLANTENVRAAG

In dit model wordt er gewerkt met een doelfunctie die de som van de pomptijden maximaliseert. Er wordt gestreefd naar een zo hoog mogelijk benuttingsgraad van de pompen.

- MAX = @SUM(LOT(I): PUMPING_TIME(I));

De doelfunctie kan uiteraard aangepast worden en dan kan geanalyseerd worden welk effect dit heeft op de volgorde van de olieproducten en op de gekozen lotvolumes.

3.2.2.4 Beperkingen

Hieronder worden de beperkingen van het model ofwel ingevuld met output van LINGO ofwel wordt de beperking kort toegelicht. De uitgebreide verklaringen van de beperkingen werden in het vorige hoofdstuk besproken.

DISCRETE KLANTENVRAAG

Opéénvolging van de loten

$$C_i - L_i \geq C_{i-1} \quad \forall i \in I^{new} \quad (1)$$

- @FOR (LOT(I) | I #GT# 1: COMPLETION_TIME(I) - PUMPING_TIME(I) > COMPLETION_TIME(I-1));

Lot 1: 15,41 - 15,41 ≥ 0

Lot 6: 168 - 34,68 ≥ 131

$$L_i \leq C_i \quad \forall i \in I^{new} \quad (2)$$

- @FOR (LOT(I): PUMPING_TIME(I) < COMPLETION_TIME(I));

Lot 1: 15,41 ≤ 15,4

Lot 6: 34,68 ≤ 168

$$C_i \leq h_{max} \quad \forall i \in I^{new} \quad (3)$$

- @FOR (LOT(I): COMPLETION_TIME(I) < HMAX);

Lot 1: 15,41 ≤ 168

Lot 6: 168 ≤ 168

Relatie tussen het lotvolume en de pomptijd

$$Q_i = vb \times L_i \quad \forall i \in I^{new} \quad (4)$$

- @FOR (LOT(I): VOLUME_OF_LOT(I) = FLOW_RATE * PUMPING_TIME(I));

Lot 1: 8000 = 519 * 15,41

Lot 6: 18000 = 519 * 34,68

Verboden volgordes van olieproducten

$$y_{i-1,p} + y_{i,p'} \leq 1 + sequence_{p,p'} \quad \forall i \in I^{new}, \forall p, p' \in P \quad (5)$$

- @FOR (LOT(I)| I #GT# 1:@FOR(PRODUCT(J1): @FOR(PRODUCT(J2): ALLOCATION(I-1,J1) + ALLOCATION(I,J2) < 1 + MATCH(J1,J2))));

Indien twee olieproducten achter elkaar gepompt mogen worden, zal de binaire variabele $sequence_{p,p'}$ aan de rechterkant een waarde van één aannemen.

Alloceren van een olieproduct aan een lot

$$\sum_p y_{i,p} = 1 \quad \forall i \in I^{new} \quad (17)$$

- @FOR (LOT(I): @SUM (PRODUCT (J): ALLOCATION (I,J)) = 1);

Deze beperking zorgt ervoor dat elk lot maar één olieproduct kan bevatten.

Keuze van de lotvolumes

$$\sum_{lt \in LT} ls_{i,p,lt} = y_{i,p} \quad \forall i \in I^{new}, p \in P \quad (18)$$

- @FOR (LOT(I): @FOR (PRODUCT(P): LS1(I,P) + LS2(I,P) = ALLOCATION(I,P)));

LS1 en LS2 zijn binaire variabelen die zorgen voor een correcte toewijzing van de mogelijke lotvolumes per olieproduct aan een lot. LS1 staat voor het grootste lotvolume van elk olieproduct. LS2 staat voor het kleinste lotvolume van elk olieproduct. LS1 of LS2 zal voor elk lot en overeenkomstig olieproduct de waarde één aannemen.

$$Q_i = \sum_{p \in P} \sum_{lt \in LT} (ls_{i,p,lt} lots_{p,lt}) \quad \forall i \in I^{new} \quad (19)$$

- @FOR (LOT(I) : @SUM (PRODUCT(P) : LS1(I,P) * MATCH_LOTS(P,1) + LS2(I,P) * MATCH_LOTS(P,2)) = VOLUME_OF_LOT(I));

Het gekozen lotvolume wordt bepaald door de som van vermenigvuldiging van de binaire variabelen LS1 en LS2 met de matrix die de twee lotvolumes per olieproduct bevat.

Evenwicht in de pijplijn bij het injecteren van een later lot (i')

$$\sum_{i \in I, i \leq i'} D_i^{i'} = Q_{i'} \quad \forall i' \in I^{new} \quad (20)$$

- @FOR (LOT(J): @SUM (LOT(I)| J #GE# I : DIS(I,J)) = VOLUME_OF_LOT(J));

De som van de fracties van de loten die in het distributiecentrum gelost worden tijdens het pompen van een later lot (i'), is gelijk aan het volume van dat later lot (i').

CONTINUE KLANTENVRAAG

Voorraadbeheer in het distributiecentrum

$$DV_{i,p}^{i'} \leq D_{max} y_{i,p} \quad \forall i \in I, i' \in I^{new}, p \in P, i' \geq i \quad (22)$$

- @FOR (LOT(I) : @FOR (LOT(J)| J #GE# I : @FOR (PRODUCT(P): DV(I,J,P) < DMAX * ALLOCATION(I,P))));

Datgene wat er van een bepaald lot in het distributiecentrum gelost wordt, mag niet groter zijn dan de maximumwaarde die een lot kan aannemen.

$$\sum_{p \in P} DV_{i,p}^{i'} = D_i^{i'} \quad \forall i \in I, i' \in I^{new}, i' \geq i \quad (23)$$

- @FOR (LOT(I): @FOR (LOT(J)| J #GE# I : @SUM (PRODUCT(P) : DV(I,J,P)) = DIS(I,J));

De som van alle 'DV's' voor alle olieproducten is gelijk aan 'D'. Tijdens het transport van een lot via een pijplijn is men enkel geïnteresseerd in het ogenblik waarop dat lot het einde van de pijplijn bereikt. Op dat ogenblik is het vereist om te achterhalen welk olieproduct het lot bevat. D moet worden omgevormd naar DV. Er is slechts één DV verschillend van nul, en dat is de DV met het olieproduct dat overeenkomt met het lot.

- @FOR(PRODUCT(P): ID(P,1) = BV_DC);

Wordt gebruikt om de beginvoorraad in het distributiecentrum te definiëren.

$$ID_{total,p}^{i'} = ID_{total,p}^{i'-1} + \sum_{i \in I, i \leq i'} DV_{i,p}^{i'} - qd_p^{i'} \quad p \in P, i' \in I^{new} \quad (24)$$

- @FOR (LOT(J) | J #GT# 1 : @FOR (PRODUCT(P) : ID(P,J) = ID(P,J-1) + @SUM(LOT(I) | J #GE# I : DV(I,J,P)) - QD(P,J)));

Deze beperking handelt over de voorraad in het distributiecentrum per type van olieproduct. Deze beperking wordt verderop in dit hoofdstuk uitgelegd aan de hand van een voorbeeld.

$$ID_{total,p}^{i'} \leq ID_{max,p} \quad p \in P, i' \in I^{new} \quad (25)$$

- @FOR (LOT(J) : @FOR (PRODUCT(P) : ID(P,J) < IDMAX));

De voorraad per type van olieproduct mag niet groter zijn dan de maximum opgelegde voorraad per type van olieproduct.

$$ID_{total,p}^{i'} \geq SS_{min} ID_{max,p} \quad p \in P, i' \in I^{new} \quad (26)$$

- @FOR (LOT(J) : @FOR (PRODUCT(P) : ID(P,J) > SS MIN * IDMAX));

De voorraad per type van olieproduct mag niet kleiner zijn dan de veiligheidsvoorraad per type van olieproduct dat moet worden aangehouden.

Discrete dagelijkse klantenvraag omvormen naar continue klantenvraag

- @FOR (DAY(K) : TDEM(K) = 24 * K);

Zet de dagelijkse tijdsschaal om naar uren. Wordt gebruikt in beperkingen (27) en (28).

$$C_i \geq TDem_k dme_{i,k} \quad \forall i \in I^{new}, k \in K \quad (27)$$

- @FOR (LOT(I) : @FOR (DAY(K) : COMPLETION_TIME(I) > TDEM(K) * DME (I,K)));

Beperking (27) wordt samen met beperking (28) gebruikt om de positievariabele $dme_{i,k}$ te berekenen. Hoe dit precies gebeurt, wordt verderop in dit hoofdstuk aangetoond.

$$C_i \leq TDem_k + h_{max} dme_{i,k} \quad \forall i \in I^{new}, k \in K \quad (28)$$

- @FOR (LOT(I) : @FOR (DAY(K) : COMPLETION_TIME(I) < TDEM(K) + HMAX * DME (I,K)));

Beperking (28) wordt samen met beperking (28) gebruikt om de positievariabele $dme_{i,k}$ te berekenen. Hoe dit precies gebeurt, wordt verderop in dit hoofdstuk aangetoond.

$$dm_{i,k}^{Final} = dme_{i,k} - dme_{i-1,k} \quad \forall i \in I^{new}, k \in K \quad (29)$$

- @FOR (LOT(I) | I #GT# 1: @FOR (DAY(K) : DMFINAL (I,K) = DME(I,K) - DME(I-1,K))) ;

De gebeurtenisvariabele $dm_{i,k}^{Final}$ wordt berekend aan de hand van de positievariabele van een lot $dme_{i,k}$ en de positievariabele van en vorig lot $dme_{i-1,k}$. Hoe dit precies gebeurt, wordt verderop in dit hoofdstuk aangetoond.

$$qd_p^i = \sum_{k \in K} Dem_{p,k} dm_{i,k}^{Final} \quad \forall i \in I^{new}, p \in P \quad (30)$$

- @FOR (LOT(I) : @FOR (PRODUCT(P) : @SUM (DAY(K) : DEM(P,K) * DMFINAL(I,K)) = QD(P,I)));

De continue klantenvraag per olieproduct wordt berekend aan de hand van de discrete klantenvraag per dag en de gebeurtenisvariabele $dm_{i,k}^{Final}$. Hoe dit precies gebeurt, wordt verderop in dit hoofdstuk aangetoond.

Hulpbeperkingen

$$\sum_{i \in I^{new}} dm_{i,k}^{Final} = 1 \quad k \in K \quad (35)$$

- @FOR (DAY(K): @SUM (LOT(I): DMFINAL(I,K)) = 1);

Deze beperking geeft aan dat een gebeurtenisvariabele voor een bepaald lot en een bepaalde dag maar één keer kan voorkomen.

$$\sum_{i'=first(I^{new})}^{i' \leq i} dm_{i',k}^{Final} \leq \sum_{i'=first(I^{new})}^{i' \leq i} dm_{i',k-1}^{Final} \quad \forall i \in I^{new}, k \in K, k > 1 \quad (36)$$

- @FOR (LOT(I) : @FOR (DAY(K)| K #GT# 1: @SUM (LOT(J)| J #LE# I: DMFINAL(J,K)) < @SUM (LOT(J)|J #LE# I: DMFINAL(J,K-1))));

Zorgt ervoor dat de gealloceerde dagen in het continue model de correcte volgorde aannemen.

Binaire variabelen definiëren

Het is belangrijk om op het einde van de programmering sommige variabelen te definiëren als een binair getal. Dit zorgt ervoor dat het model betrouwbare resultaten oplevert.

- @FOR (PRODUCTION_SEQUENCE: @BIN (ALLOCATION));
- @FOR (DAY_IN_INTERVAL: @BIN(DME));
- @FOR (DAY_IN_INTERVAL: @BIN(DMFINAL));
- @FOR (PRODUCTION_SEQUENCE: @BIN (LS1));
- @FOR (PRODUCTION_SEQUENCE: @BIN (LS2));

De '@BIN' wordt toegepast voor 'ALLOCATION', 'DME', 'DMFINAL', 'LS1' en 'LS2'. Om dit te verduidelijken, wordt hieronder een voorbeeld uitgewerkt voor LS1 en LS2.

Bij het niet definiëren van een binaire variabele voor LS1 en LS2 zou er een relaxatie tussen de twee kunnen optreden en kan bijvoorbeeld LS1(3,2) een waarde van 0,149 aannemen in plaats van een waarde van nul of één. LS2(3,2) neemt bijgevolg een waarde van 0,851 aan in plaats van een waarde van één of nul. Dit kan ervoor zorgen dat een lotvolume wordt toegewezen aan een lot dat niet overeenstemt met de vooraf bepaalde lotvolumes per olieproduct. In dit voorbeeld zou het derde lot een lotvolume van 9192 m³ (0,149 * 16000 + 0,851 * 8000) hebben. Dit mag uiteraard niet.

3.2.3 Bespreking resultaten

Voorbeeld 1: model van zes loten, drie olieproducten en zeven dagen

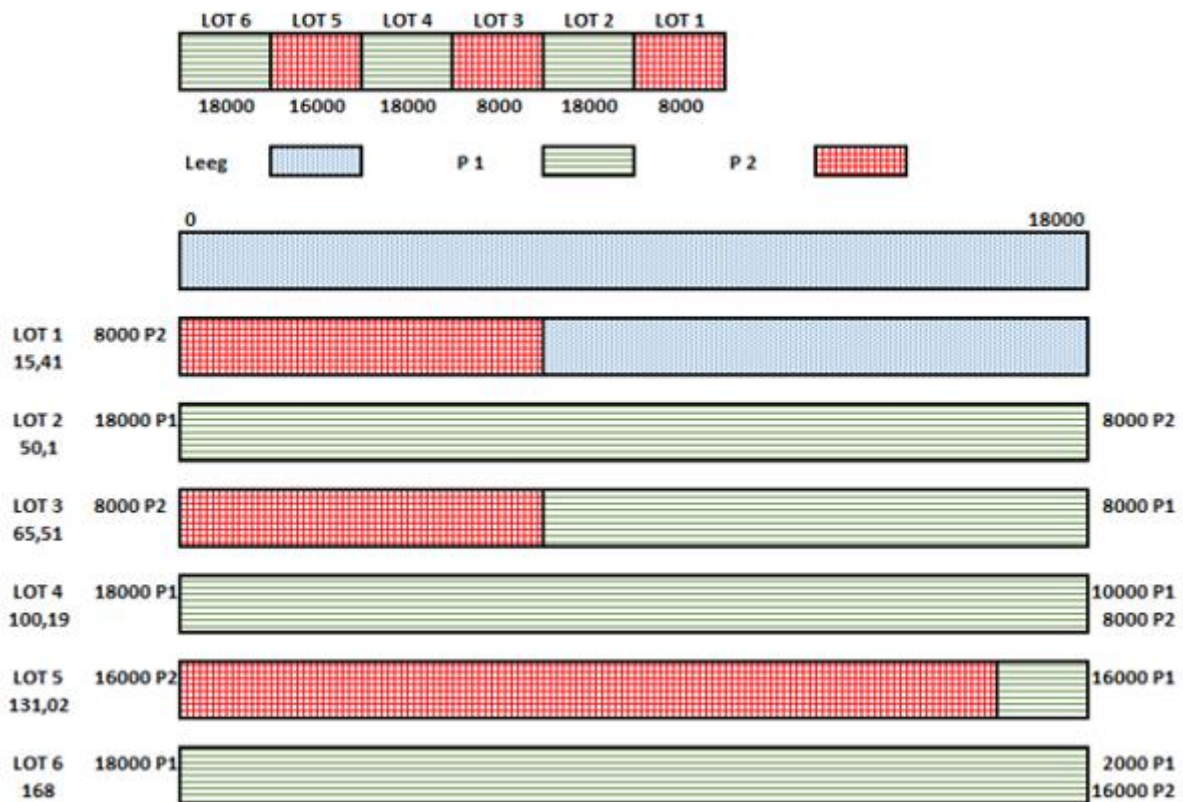
De pomptijd per lot bedraagt 15,41 uren, 34,68 uren of 30,83 uren. De eerste eindtijd¹³ heeft een waarde van 15,41 uren en de laatste eindtijd heeft een waarde van 168 uren. Een stoptijd van 2,3 uren is aanwezig. Deze treedt op na het pompen van het vijfde lot. Daarnaast wordt vijf keer gekozen voor het kleinste lotvolume per type van olieproduct, namelijk 'LS2'. Enkel lot vijf dat olieproduct twee bevat, krijgt het grootste lotvolume toegewezen. Verder wordt opgemerkt dat de 'MATCHES' correct gebeuren: (1,2), (1,3), (2,1) en (3,1) krijgen allemaal de waarde één. De rest krijgt de waarde nul. De pomptijd, stoptijd en eindtijd zijn terug te vinden in tabel 3. De overige output is terug te vinden in bijlage 6.2.

¹³ De completion time van een lot

Tabel 3

Lot	Pomptijd	Stoptijd	Eindtijd
1	15,41	0	15,41
2	34,68	0	50,1
3	15,41	0	65,51
4	34,68	0	100,19
5	30,83	0	131,02
6	34,68	2,3	168,0

Voor de allocatie van de olieproducten aan de loten werd door LINGO de volgende volgorde berekend: lot één bevat olieproduct twee, lot twee bevat olieproduct één, lot drie bevat olieproduct twee, lot vier bevat olieproduct één, lot vijf bevat olieproduct twee en lot zes bevat olieproduct één.



Figuur 4

Toelichting figuur 4

Het systeem start met een lege pijplijn van 18000 m³. Het eerste lot bevat olieproduct twee met een lotvolume van 8000 m³ en wordt in de pijplijn geïnjecteerd. Na 15,41 uren zit heel dit lot in de pijplijn en is nog steeds 10000 m³ van de pijplijn leeg. Direct na dit eerste lot wordt het tweede lot geïnjecteerd. Het tweede lot bevat olieproduct één en heeft een lotvolume van 18000 m³. Na 50,1 uren is ook dit lot helemaal in de pijplijn gepompt. Echter, aangezien olieproducten niet samendrukbaar zijn, is aan het uiteinde van de pijplijn, 8000 m³ van het eerste lot dat olieproduct twee bevat, gelost. Na 50,1 uren is de pijplijn helemaal gevuld met olieproduct één. Direct na het pompen van het tweede lot, wordt het derde lot gepompt. Het derde lot bevat olieproduct twee en heeft een lotvolume van 8000 m³. Na 65,51 uren is dit lot volledig gepompt en is 8000 m³ van het vorige lot, dat olieproduct één bevat, gelost. Hierna volgt het vierde lot dat olieproduct één bevat en een lotvolume van 18000 m³ heeft. Na 100,19 uren is dit lot klaar met pompen en is er 10000 m³ van olieproduct één en 8000 m³ van olieproduct twee gelost. Weer direct na het pompen van het vierde lot, is het vijfde lot, dat olieproduct twee bevat en een lotvolume van 16000 m³ bevat, aan de beurt. Na 131,02 uren is dit lot gepompt en is 16000 m³ van olieproduct één gelost. In tegenstelling tot de voorgaande loten wordt het zesde en laatste lot niet direct gepompt. Een stoptijd van 2,3 uren vindt plaats. Dit wil zeggen dat de pompen 2,3 uren stilliggen. In plaats van dat na 131,02 uren gestart wordt met het pompen van het zesde lot wordt pas na 133,32 uren gestart met het pompen van dit lot. Het laatste lot is klaar met pompen na exact 168 uren. Er wordt verder nog 2000 m³ van olieproduct één en 16000 m³ van olieproduct twee gelost. De pompen worden in het totaal 165,7 uren van de 168 uren gebruikt waardoor de benuttingsgraad van de pompen 98,63% bedraagt.

DISCRETE KLANTENVRAAG

In het distributiecentrum wordt op dag één gestart met een beginvoorraad van 52397 m³ voor olieproduct één, 17565 m³ voor olieproduct twee en 19888 m³ voor olieproduct vier. Een discrete klantenvraag betekent dat er dagelijks dezelfde vraag is naar elk type van olieproduct: 7209 m³ voor olieproduct één, 2361 m³ voor olieproduct twee en 2483 m³ voor olieproduct vier.

Voordat gestart wordt met de berekening van de voorraad moet opgemerkt worden dat de voorraad in het distributiecentrum enkel wordt aangepast op de eindtijden. Indien 90% van een lot op dag twee wordt gelost en 10% van hetzelfde lot op dag drie, wordt de voorraad pas op dag drie aangepast aangezien de eindtijd op die dag valt. Dit is een assumptie die in deze masterproef wordt aangenomen. Het is perfect mogelijk om andere berekeningen toe te passen.

Op dag één wordt er nog niets geleverd omdat het eerste lot nog niet op het einde van de pijplijn geraakt is. Hierdoor zal de beginvoorraad van elk olieproduct dalen naar 45188 m³, 15204 m³ en 17405 m³. Op dag twee zal er ook niets gelost worden omdat het tweede lot nog niet volledig gepompt is. De voorraden dalen naar 37979 m³, 12843 m³ en 14922 m³. Op dag drie zal echter 8000 m³ van olieproduct twee alsook 8000 m³ van olieproduct twee gelost worden. Als de dagelijkse vraag ook in rekening wordt genomen, zal de voorraad 37770 m³, 18482 m³ en 12439 m³ bedragen. Op dag vier is enkel een vraag naar de drie olieproducten waardoor de voorraad daalt naar 31561 m³,

16121 m³ en 9956 m³. Op dag vijf wordt er weer 10000 m³ van olieproduct één en 8000 m³ van olieproduct twee gelost. Na aftrek van de vraag, zal de voorraad 34352 m³, 21760 m³ en 7473 m³ bedragen. Op dag zes wordt er 16000 m³ van olieproduct één gelost. De nieuwe voorraadvolumes zijn 43143 m³, 19399 m³ en 4990 m³. Op dag zeven wordt er ten slotte nog 2000 m³ van olieproduct één en 16000 m³ van olieproduct twee gelost. De eindvoorraad is 35934 m³, 17038 m³ en 2507 m³. De waarden van de voorraad die gebaseerd zijn op de discrete klantenvraag zijn terug te vinden in tabel 4.

Tabel 4

Dag	Interval	Product 1	Product 2	Product 4
1	]0-24]	45188	15204	17405
2	]24,48]	37979	12843	14922
3	]48,72]	38770	18482	12439
4	]72,96]	31561	16121	9956
5	]96,120]	34352	21760	7473
6	]120,144]	43143	19399	4990
7	]144,168]	35934	17038	2507

De eindvoorraad van olieproduct twee zal niet veel verschillen van de beginvoorraad. De eindvoorraad van olieproduct één bedraagt 10000 m³ minder dan de beginvoorraad, maar dat vormt geen probleem. Voor olieproduct vier daarentegen kan de lage eindvoorraad van 2507 m³ wel een probleem betekenen. Deze lage voorraad is natuurlijk te wijten aan het feit dat olieproduct vier niet gepompt wordt. Echter hoeft dit niet altijd een probleem te vormen indien het distributiecentrum op voorhand weet dat de vraag naar olieproduct vier de volgende week beduidend lager ligt. Indien dit niet het geval is, moet gekozen worden voor een andere volgorde.

CONTINUE KLANTENVRAAG

Aangezien de dagelijkse klantenvraag een belangrijke rol speelt, maar deze discrete informatie bevat, moet deze vraag worden omgevormd naar een continue representatie. Dit wordt gedaan aan de hand van twee binaire beslissingsvariabelen, namelijk de positievariabele $dme_{i,k}$ en de gebeurtenisvariabele $dm_{i,k}^{Final}$. Hoe de omzetting precies gebeurt, wordt getoond aan de hand van een voorbeeld.

Voorbereiding op beperking (27) tot en met (30)

Vooraleer gestart wordt met het uitleggen van de eerste beperking die bijdraagt tot het omvormen van de discrete dagelijkse klantenvraag naar een continue klantenvraag is het vereist om $TDem_k$,

die staat voor het aantal dagen, te vermenigvuldigen met 24, het aantal uren per dag. De reden hiervoor is het gegeven dat de completion time in dit model in uren wordt uitgedrukt.

$$TDem_k = k * 24$$

Beperking (27)

$$C_i \geq TDem_k dme_{i,k} \quad \forall i \in I^{new}, k \in K$$

Lot 1

Dag 1: $15,41 \geq 24 * 0$

...

Dag 7: $15,41 \geq 168 * 0$

Lot 2

Dag 1: $50,1 \geq 24 * (0 \text{ of } 1)$

Dag 2: $50,1 \geq 48 * (0 \text{ of } 1)$

Dag 3: $50,1 \geq 72 * 0$

...

Dag 7: $50,1 \geq 168 * 0$

De waarden van $dme_{i,k}$ voor beperking (27) zijn terug te vinden in tabel 5.

Tabel 5

$dme_{i,k}$	Lot 1	Lot 2	Lot 3	Lot 4	Lot 5	Lot 6
Dag 1	0	0 of 1	0 of 1	0 of 1	0 of 1	0 of 1
Dag 2	0	0 of 1	0 of 1	0 of 1	0 of 1	0 of 1
Dag 3	0	0	0	0 of 1	0 of 1	0 of 1
Dag 4	0	0	0	0 of 1	0 of 1	0 of 1
Dag 5	0	0	0	0	0 of 1	0 of 1
Dag 6	0	0	0	0	0	0 of 1
Dag 7	0	0	0	0	0	0 of 1

Beperking (28)

$$C_i \leq TDem_k + h_{max} dme_{i,k} \quad \forall i \in I^{new}, k \in K$$

Lot 1

$15,41 \leq 24 + 168 * (0 \text{ of } 1)$

...

$$15,41 \leq 168 + 168 * (0 \text{ of } 1)$$

Lot 2

$$50,1 \leq 24 + 168 * 1$$

$$50,1 \leq 48 + 168 * 1$$

$$50,1 \leq 72 + 168 * (0 \text{ of } 1)$$

...

$$50,1 \leq 168 + 168 * (0 \text{ of } 1)$$

De waarden van $dme_{i,k}$ voor beperking (28) zijn terug te vinden in tabel 6.

Tabel 6

$dme_{i,k}$	Lot 1	Lot 2	Lot 3	Lot 4	Lot 5	Lot 6
Dag 1	0 of 1	1	1	1	1	1
Dag 2	0 of 1	1	1	1	1	1
Dag 3	0 of 1	0 of 1	0 of 1	1	1	1
Dag 4	0 of 1	0 of 1	0 of 1	1	1	1
Dag 5	0 of 1	0 of 1	0 of 1	0 of 1	1	1
Dag 6	0 of 1	0 of 1	0 of 1	0 of 1	0 of 1	1
Dag 7	0 of 1	0 of 1	0 of 1	0 of 1	0 of 1	1

Samenvoeging beperkingen (27) en (28)

Indien beperkingen (27) en (28) samen worden bekeken, kan $dme_{i,k}$ nog maar één waarde aannemen. De waarden van $dme_{i,k}$ na samenvoeging van beperkingen (27) en (28) zijn terug te vinden in tabel 7.

Tabel 7

$dme_{i,k}$	Lot 1	Lot 2	Lot 3	Lot 4	Lot 5	Lot 6
Dag 1	0	1	1	1	1	1
Dag 2	0	1	1	1	1	1
Dag 3	0	0	0	1	1	1
Dag 4	0	0	0	1	1	1
Dag 5	0	0	0	0	1	1
Dag 6	0	0	0	0	0	1
Dag 7	0	0	0	0	0	1

Beperking (29)

$$dm_{i,k}^{Final} = dme_{i,k} - dme_{i-1,k} \quad \forall i \in I^{new}, k \in K \quad \text{met } dme_{0,k} = 0$$

Lot 1

$$dm_{1,1}^{Final} = dme_{1,1} - dme_{0,1}$$

$$dm_{1,2}^{Final} = dme_{1,2} - dme_{0,2}$$

$$dm_{1,3}^{Final} = dme_{1,3} - dme_{0,3}$$

$$dm_{1,4}^{Final} = dme_{1,4} - dme_{0,4}$$

$$dm_{1,5}^{Final} = dme_{1,5} - dme_{0,5}$$

$$dm_{1,6}^{Final} = dme_{1,6} - dme_{0,6}$$

$$dm_{1,7}^{Final} = dme_{1,7} - dme_{0,7}$$

Lot 2

$$dm_{2,1}^{Final} = dme_{2,1} - dme_{1,1}$$

$$dm_{2,2}^{Final} = dme_{2,2} - dme_{1,2}$$

$$dm_{2,3}^{Final} = dme_{2,3} - dme_{1,3}$$

$$dm_{2,4}^{Final} = dme_{2,4} - dme_{1,4}$$

$$dm_{2,5}^{Final} = dme_{2,5} - dme_{1,5}$$

$$dm_{2,6}^{Final} = dme_{2,6} - dme_{1,6}$$

$$dm_{2,7}^{Final} = dme_{2,7} - dme_{1,7}$$

De waarden van $dm_{i,k}^{Final}$ zijn terug te vinden in tabel 8.

Tabel 8

$dm_{i,k}^{Final}$	Lot 1	Lot 2	Lot 3	Lot 4	Lot 5	Lot 6
Dag 1	0	1	0	0	0	0
Dag 2	0	1	0	0	0	0
Dag 3	0	0	0	1	0	0
Dag 4	0	0	0	1	0	0
Dag 5	0	0	0	0	1	0
Dag 6	0	0	0	0	0	1
Dag 7	0	0	0	0	0	1

Beperking (30)

$$qd_p^i = \sum_{k \in K} Dem_{p,k} dm_{i,k}^{Final} \quad \forall i \in I^{new}, p \in P$$

Olieproduct 1, lot 1

$$qd_1^1 = Dem_{1,1} dm_{1,1}^{Final} + Dem_{1,2} dm_{1,2}^{Final} + Dem_{1,3} dm_{1,3}^{Final} + Dem_{1,4} dm_{1,4}^{Final} \\ + Dem_{1,5} dm_{1,5}^{Final} + Dem_{1,6} dm_{1,6}^{Final} + Dem_{1,7} dm_{1,7}^{Final}$$

$$qd_1^1 = 7209 * 0 + 7209 * 0 + 7209 * 0 + 7209 * 0 + 7209 * 0 + 7209 * 0 + 7209 * 0 = 0$$

Olieproduct 1, lot 6

$$qd_1^6 = Dem_{1,1} dm_{6,1}^{Final} + Dem_{1,2} dm_{6,2}^{Final} + Dem_{1,3} dm_{6,3}^{Final} + Dem_{1,4} dm_{6,4}^{Final} \\ + Dem_{1,5} dm_{6,5}^{Final} + Dem_{1,6} dm_{6,6}^{Final} + Dem_{1,7} dm_{6,7}^{Final}$$

$$qd_1^6 = 7209 * 0 + 7209 * 0 + 7209 * 0 + 7209 * 0 + 7209 * 0 + 7209 * 1 + 7209 * 1 \\ = 14418$$

Olieproduct 4, lot 2

$$qd_4^2 = Dem_{4,1} dm_{2,1}^{Final} + Dem_{4,2} dm_{2,2}^{Final} + Dem_{4,3} dm_{2,3}^{Final} + Dem_{4,4} dm_{2,4}^{Final} \\ + Dem_{4,5} dm_{2,5}^{Final} + Dem_{4,6} dm_{2,6}^{Final} + Dem_{4,7} dm_{2,7}^{Final}$$

$$qd_1^6 = 2483 * 1 + 2483 * 1 + 2483 * 0 + 2483 * 0 + 2483 * 0 + 2483 * 1 + 2483 * 1 = 4966$$

De waarden van qd_p^i zijn terug te vinden in tabel 9.

Tabel 9

Lot	Product 1	Product 2	Product 4
1	0	0	0
2	14418	4722	4966
3	0	0	0
4	14418	4722	4966
5	7209	2361	2483
6	14418	4722	4966

Beperking (24)

De waarden van qd_p^i worden vervolgens gebruikt om de voorraad te berekenen.

$$ID_{total,p}^{i'} = ID_{total,p}^{i'-1} + \sum_{i \in I, i \leq i'} DV_{i,p}^{i'} - qd_p^{i'} \quad p \in P, i' \in I^{new}$$

Olieproduct 1, lot 1 tot en met lot 6

$$ID_{total,1}^1 = 52397 + 0 - 0 = 52397$$

$$ID_{total,1}^2 = 52397 + 18000 - 14418 = 55979$$

$$ID_{total,1}^3 = 55979 + 0 - 0 = 55979$$

$$ID_{total,1}^4 = 55979 + 18000 - 14418 = 59561$$

$$ID_{total,1}^5 = 59561 + 0 - 7209 = 52352$$

$$ID_{total,1}^6 = 52352 + 18000 - 14418 = 55934$$

De waarden van $ID_{total,p}^{i'}$ zijn terug te vinden in tabel 10.

Tabel 10

Lot	Product 1	Product 2	Product 4
1	52397	17565	19888
2	55979	12843	14922
3	55979	20843	14922
4	59561	16121	9956
5	52352	29760	7473
6	55934	25038	2507

Vershil voorraad discrete en continue klantenvraag

Het verschil tussen beiden schuilt in de klantenvraag die in het discrete model iedere dag hetzelfde is in tegenstelling tot die van het continue model. De klantenvraag voor het continue model bedraagt voor twee dagen nul, voor drie dagen het dubbel en komt slechts voor één dag overeen met de discrete dagelijkse klantenvraag. Verder wordt voor olieproduct vier opgemerkt dat de eindvoorraden voor het discrete en continue model hetzelfde zijn. Dit bewijst dat de omvorming van de discrete klantenvraag naar de continue klantenvraag correct is geprogrammeerd.

Desalniettemin moet worden meegedeeld dat de eindvoorraad van het continue model voor olieproduct één en olieproduct twee niet overeenstemt met die van het discrete model. Uit de output is foutief af te lezen dat voor olieproduct één na de completion time van het tweede lot een levering plaatsvindt van 18000 m³. Deze levering gebeurt echter niet. Deze redenering kan ook toegepast worden voor olieproduct twee maar dan voor 8000 m³. De eindvoorraad is voor beide olieproducten bijgevolg te hoog.

Om toch de correcte eindvoorraad te berekenen, kan 18000 m³ van de eindvoorraad van olieproduct één en 8000 m³ van de eindvoorraad van olieproduct twee worden afgetrokken.

Een mogelijke reden voor deze fout kan te maken hebben met het gegeven dat dit model start met een lege pijplijn in plaats van een volle pijplijn. Dit zal in de toekomst zeker moeten worden uitgeklaard.

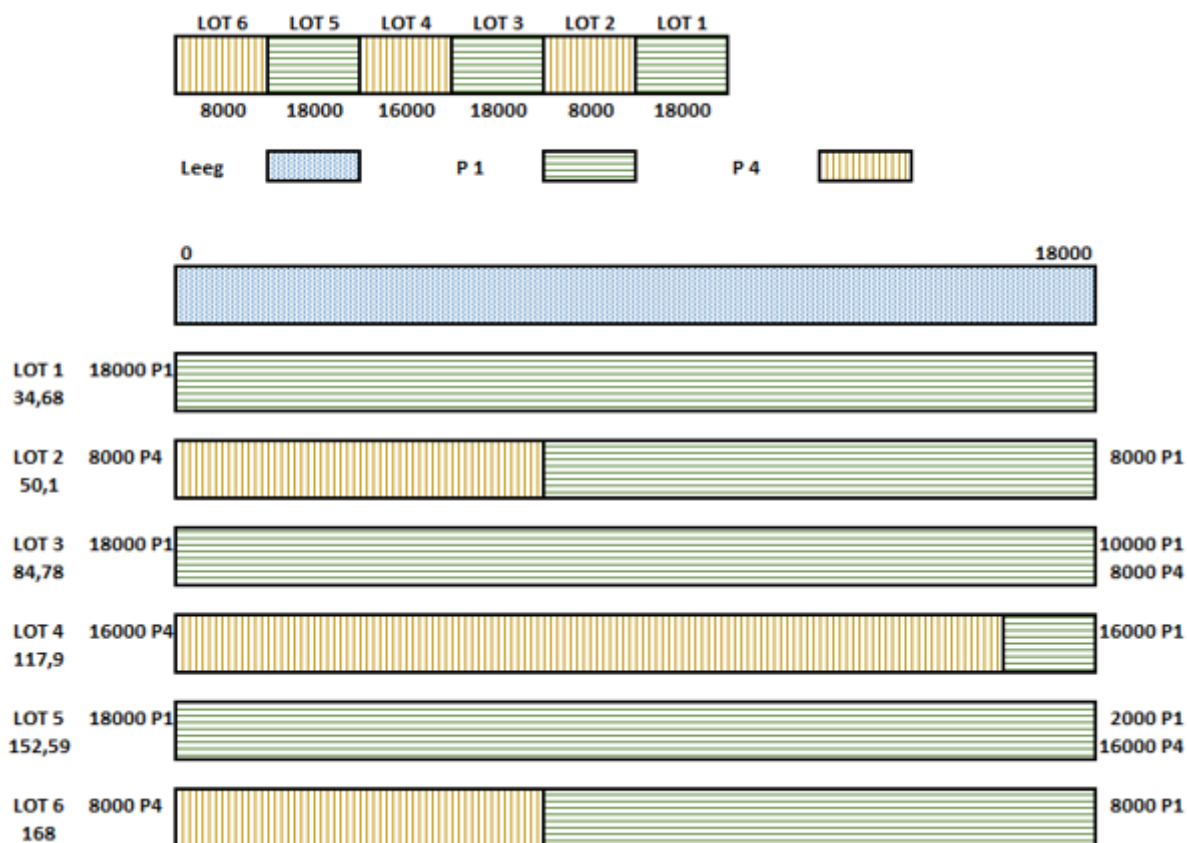
Voorbeeld 2: zes loten, drie olieproducten en zeven dagen

Het is perfect mogelijk dat LINGO meerdere optimale schedules berekent. Dit wil zeggen dat een andere volgorde van olieproducten met eventueel andere lotvolumes wordt bepaald. Dit kan te maken hebben met de volgorde waarin LINGO de beperkingen behandelt. Zolang de waarde van de doelfunctie hetzelfde is, zijn al deze opties evenwaardig.

In voorbeeld twee wordt er een resultaat bekomen waarin, in tegenstelling tot voorbeeld één, olieproduct vier gepompt wordt in plaats van olieproduct twee. De lotvolumes blijven echter wel hetzelfde (zie figuur 5). De pomptijd, stoptijd en eindtijd zijn terug te vinden in tabel 11. Wat betreft de voorraad zal deze hetzelfde verloop kennen als die van voorbeeld één. Het verschil is dat de voorraad van olieproduct twee problemen kan opleveren (zie tabel 12). De benuttingsgraad van de pompen blijft hetzelfde, enkel de stoptijd zal deze keer optreden na het pompen van het derde lot in plaats van na het pompen van het vijfde lot.

Tabel 11

Lot	Pomptijd	Stoptijd	Eindtijd
1	34,68	0	34,68
2	15,41	0	50,1
3	34,68	0	84,78
4	30,83	2,3	117,9
5	34,68	0	152,59
6	15,41	0	168



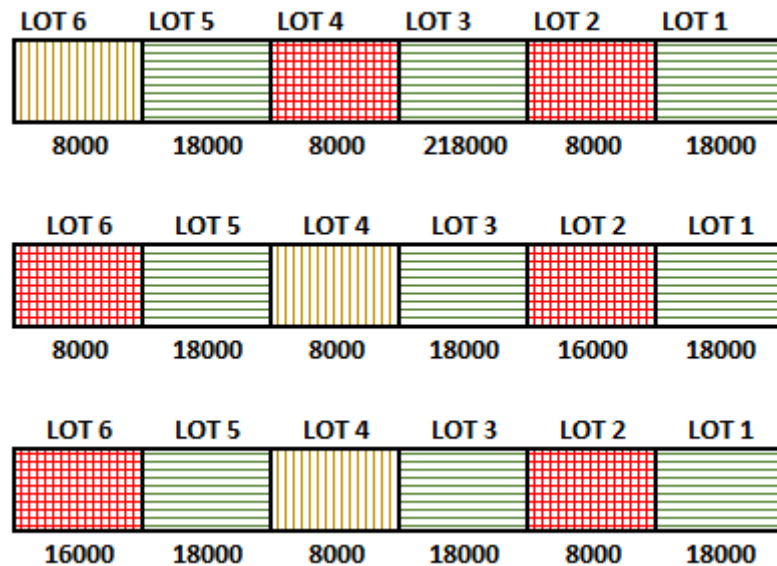
Figuur 5

Tabel 12

Dag	Interval	Product 1	Product 2	Product 4
1	]0-24]	45188	15204	17405
2	]24,48]	37979	12843	14922
3	]48,72]	38770	10482	12439
4	]72,96]	41561	8121	17956
5	]96,120]	50352	5760	15473
6	]120,144]	43143	3399	12990
7	]144,168]	45934	1038	26507

Voorbeeld 3: zes loten, drie olieproducten en zeven dagen

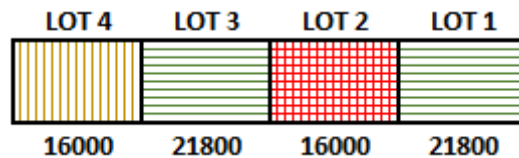
Het kan natuurlijk eveneens voorvallen dat het model een schedule berekent die wel gebruik maakt van de drie olieproducten. Daarnaast kan het ook voorkomen dat twee keer dezelfde volgorde van olieproducten wordt verkregen maar dat de lotvolumes verschillen (zie figuur 3).



Figuur 6

Voorbeeld 4: vier loten, drie olieproducten en zeven dagen

Een extra controle om de correctheid van het model te testen, kan uitgevoerd worden door het aantal loten te verminderen naar vier. Aangezien de doelfunctie het maximaliseren van de pomptijd is, zou hier dus voor de grootste lotvolumes per olieproduct gekozen moeten worden. Dit is inderdaad het geval (zie figuur 7). De schedule met vier loten zal in de realiteit echter niet snel gekozen worden omdat de benuttingsgraad van de pompen daalt naar 87%. Men streeft naar een zo hoog mogelijke benuttingsgraad van de pompen.

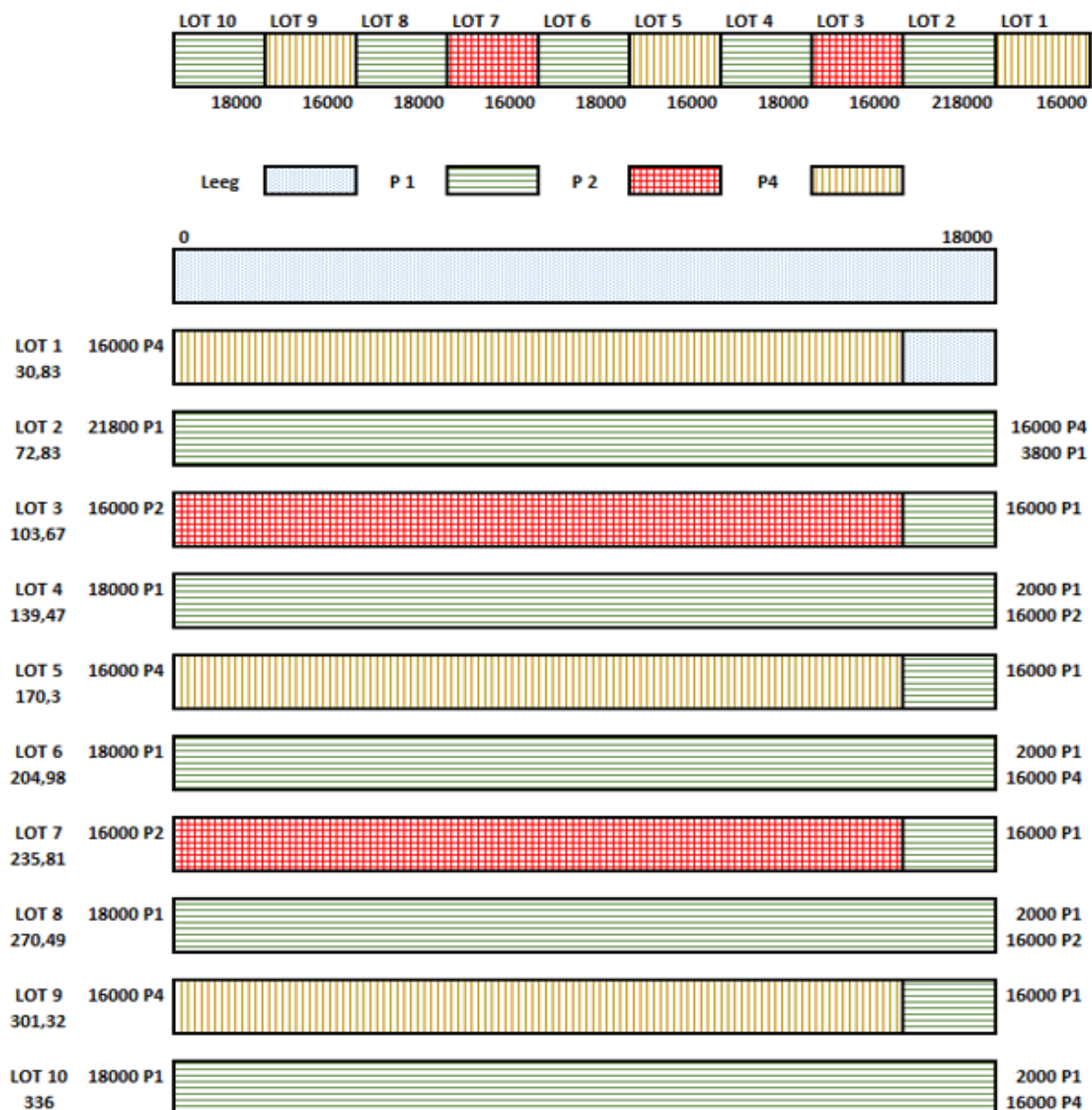


Figuur 7

Voorbeeld 5: tien loten, drie olieproducten en 14 dagen

Met de vorige vier voorbeelden werd aangetoond dat er meerdere schedules mogelijk zijn voor hetzelfde aantal loten, hetzelfde aantal olieproducten en dezelfde tijdshorizon. Dit wordt nu uitgebreid naar tien loten, drie olieproducten en 14 dagen (zie figuur 8). De pomptijden, stoptijden en eindtijden zijn terug te vinden in tabel 13.

In dit voorbeeld valt op dat het distributiecentrum op geen enkel moment in de problemen komt met een te lage voorraad. Enkel olieproduct twee zal op dag vijf een redelijk lage voorraad van 5760 m3 hebben (zie tabel 14). De berekening van de voorraad werd gedaan door het toepassen van een discrete klantenvraag.



Figuur 8

Tabel 13

Lot	Pomptijd	Stoptijd	Eindtijd
1	30,83	0	30,83
2	42,00	0	72,83
3	30,83	0	103,67
4	34,68	1,13	139,47
5	30,83	0	170,30
6	34,68	0	204,98
7	30,83	0	235,81
8	34,68	0	270,49
9	30,83	0	301,32
10	34,68	0	336,00

Tabel 14

Dag	Interval	Product 1	Product 2	Product 4
1	]0-24]	45188	15204	17405
2	]24,48]	37979	12843	14922
3	]48,72]	30770	10482	12439
4	]72,96]	27361	8121	25956
5	]96,120]	36152	5760	23473
6	]120,144]	30943	19399	20990
7	]144,168]	23734	17038	18507
8	]168,192]	32525	14677	16024
9	]192,216]	27316	12316	29541
10	]216,240]	36107	9955	27058
11	]240,264]	28898	7594	24575
12	]264,288]	23689	21233	22092
13	]288,312]	32480	18872	19609
14	]312,336]	27271	16511	33126

3.2.4 Verandering doelfunctie

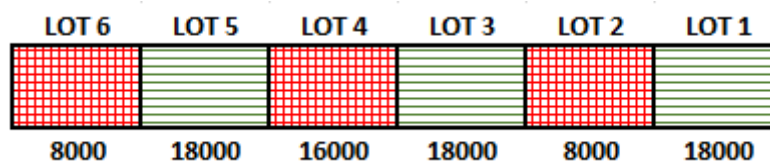
Voor bovenstaande voorbeelden werd telkens gebruik gemaakt van een doelfunctie die enkel de som van de pomptijden maximaliseert namelijk:

$$\text{- MAX} = \text{@SUM}(\text{LOT}(\text{I}): \text{PUMPING_TIME}(\text{I}));$$

Echter is het mogelijk om de doelfunctie aan te passen of uit te breiden. Dit werd hieronder gedaan door naast de som van de pomptijden ook de som van de gebruikte lotvolumes te maximaliseren.

$$\text{- MAX} = \text{@SUM}(\text{LOT}(\text{I}): \text{PUMPING_TIME}(\text{I})) + \text{@SUM}(\text{LOT}(\text{I}): \text{VOLUME_OF_LOT}(\text{I}));$$

Er werd onderzocht of dit een impact had op de toewijzing van de olieproducten aan de loten en op de keuze van de gebruikte lotvolumes. Het resultaat was negatief. Deze toevoeging veroorzaakte geen specifieke veranderingen. Figuur 8 is één van de mogelijke uitkomsten.



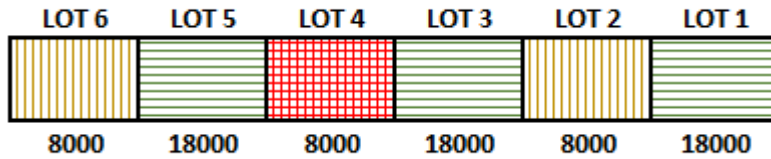
Figuur 8

Hierna werd geprobeerd om nog een derde term toe te voegen aan de doelfunctie maar om onduidelijke redenen, gaf het systeem een foutmelding. Hier kan dus niets rond geconcludeerd worden.

$$\text{- MAX} = \text{@SUM}(\text{LOT}(\text{I}): \text{PUMPING_TIME}(\text{I})) + \text{@SUM}(\text{LOT}(\text{I}): \text{VOLUME_OF_LOT}(\text{I})) + \text{@FOR}(\text{LOT}(\text{I}): \text{@SUM}(\text{PRODUCT}(\text{P}): \text{ID}(\text{P}, \text{I})));$$

Verder werd bekeken wat het effect van een minimalisatie van de doelfunctie is. De pomptijden en de gebruikte lotvolumes moeten bij een minimalisatie in theorie zo klein mogelijk zijn. Dit is ook het geval. De totale pomptijd bedraagt 150,27 uren en het gepompte volume is 78000 m³. Verder moet onthouden worden dat er altijd minstens drie loten van product één gepompt moeten worden aangezien olieproduct twee en olieproduct vier niet achter elkaar mogen worden gepompt. Het kleinste lotvolume van olieproduct één bedraagt 18000 m³ en niet 8000 m³ zoals die van olieproduct twee en olieproduct vier. De benuttingsgraad van de pompen daalt overigens naar 89,45%. Figuur 9 is één van de mogelijke uitkomsten.

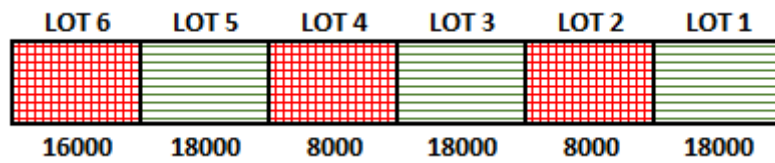
$$\text{- MIN} = \text{@SUM}(\text{LOT}(\text{I}): \text{PUMPING_TIME}(\text{I})) + \text{@SUM}(\text{LOT}(\text{I}): \text{VOLUME_OF_LOT}(\text{I}));$$



Figuur 9

Ten slotte kunnen er verschillende gewichten toegekend worden aan de termen van de doelfunctie. Indien gebruik wordt gemaakt van twee termen geeft LINGO automatisch een gewicht van 0,5 mee aan de eerste term en 0,5 aan de tweede term. De gewichten werden veranderd naar 0,25 voor de eerste term en 0,75 voor de tweede term. Dit leverde geen nieuwe resultaten op. Figuur 10 is één van de mogelijke uitkomsten.

$$\text{MAX} = (0.25 * @SUM(\text{LOT}(I): \text{PUMPING_TIME}(I))) + (0.75 * @SUM(\text{LOT}(I): \text{VOLUME_OF_LOT}(I)));$$



Figuur 10

Conclusie veranderen van de doelfunctie

Met bovenstaande voorbeelden wordt aangetoond dat de verandering van de doelfunctie een miniem effect heeft op de resultaten. Echter moet de kanttekening worden gemaakt dat het hier slechts om zes loten, drie olieproducten en zeven dagen gaat. Indien er gebruik wordt gemaakt van een langere tijdshorizon kunnen de effecten groter zijn.

HOOFDSTUK 4: CONCLUSIE

Er werd met succes een model in LINGO ontwikkeld dat bruikbare schedules berekent voor de toewijzing van drie verschillende types van olieproducten aan respectievelijk zes loten met een tijdshorizon van zeven dagen en aan tien loten met een tijdshorizon van 14 dagen. Het model houdt onder andere rekening met olieproducten die niet achter elkaar gepompt mogen worden en met de matrix van lotvolumes waaruit gekozen kan worden.

LINGO kan verschillende voorstellen wat betreft schedules doen. Echter, zolang de waarde van de doelfunctie niet verandert, zijn al deze voorstellen geldig. De scheduler kan vervolgens door een manuele berekening van de voorraad, die gebaseerd is op de discrete klantenvraag, de meest optimale schedule kiezen.

Er werd getracht om ook een berekening van de voorraad, die gebaseerd is op een continue klantenvraag, in LINGO te programmeren maar deze output leverde geen correcte resultaten op. De eindvoorraad kan berekend worden maar voor de tussenvorraden is dit moeilijker.

Indien het model in gebruik wordt genomen, is het aangeraden om voor een tijdshorizon van 14 dagen te scheduleren. Bij een tijdshorizon van 14 dagen is de kans groter dat de types van olieproducten meer verspreid zitten.

Wat eveneens niet over het hoofd gezien mag worden, is het feit dat er slechts gescheduled werd voor een tijdshorizon van zeven en 14 dagen. Indien een scheduler een bestelling binnenkrijgt voor 28 dagen kan de schedule van 14 dagen tweemaal herhaald worden. De pomptijden, stoptijden en eindtijden moeten voor de tweede periode wel manueel berekend worden. Men kan ook direct scheduleren voor een tijdshorizon van 28 dagen maar samen met de verhoging van het aantal loten zal dit beduidend langer duren voordat LINGO een output kan genereren.

Toekomst

Hoofdstuk twee van de praktijkstudie werd aangevat met de doelstelling om 30 beperkingen uit het artikel van Relvas et al. (2006) om te vormen naar input voor LINGO. Al snel werd duidelijk dat de variabelen in beperking (6) tot en met beperking (14) geen resultaten opleverden. De variabelen kregen in de output allemaal de waarde nul. Er kan echter niet met zekerheid geconcludeerd worden of deze variabelen bijna altijd een waarde verschillend van nul moeten opleveren. In het artikel van Relvas et al. (2006) werd het volgende beweerd:

“Any event that occurs in the process other than the end of the pumping of each lot must be reported tot that event” (p 7845)

Het citaat hierboven kan slaan op de stoptijd die ook in dit model optreedt, maar het kan ook betrekking hebben op iets totaal anders. Deze onduidelijkheid kan in toekomst eventueel opgehelderd worden.

Het achterwege laten van deze beperkingen heeft geen impact gehad op het generen van bruikbare schedules. Wat later eveneens in detail bestudeerd kan worden, is het verder bestuderen van de programmering van de voorraad die gebaseerd is op de continue klantenvraag.

HOOFDSTUK 5: LIJST VAN GERAADPLEEGDE WERKEN

Boschetto, S. N., Magatão, L., Brondani, W. M., Neves-Jr, F., Arruda, L. V., Barbosa-Póvoa, A. P., & Relvas, S. (2010). An operational scheduling model to product distribution through a pipeline network. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49(12), 5661–5682.

Cafaro, D. C., & Cerdá, J. (2004). Optimal scheduling of multiproduct pipeline systems using a non-discrete MILP formulation. *Computers & Chemical Engineering*, 28(10), 2053–2068.

Cafaro, D. C., & Cerdá, J. (2008). Dynamic scheduling of multiproduct pipelines with multiple delivery due dates. *Computers & Chemical Engineering*, 32(4), 728–753.

Cafaro, D. C., & Cerdá, J. (2009). Optimal scheduling of refined products pipelines with multiple sources. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(14), 6675–6689.

Cafaro, V. G., Cafaro, D. C., Méndez, C. A., & Cerdá, J. (2011). Detailed scheduling of operations in single-source refined products pipelines. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(10), 6240–6259.

Cafaro, V. G., Cafaro, D. C., Méndez, C. A., & Cerdá, J. (2012). Detailed scheduling of single-source pipelines with simultaneous deliveries to multiple offtake stations. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(17), 6145–6165.

Cafaro, V. G., Cafaro, D. C., Méndez, C. A., & Cerdá, J. (2015). Optimization model for the detailed scheduling of multi-source pipelines. *Computers & Industrial Engineering*, 88, 395–409.

De Souza Filho, E. M., Bahiense, L., & Ferreira Filho, V. J. M. (2013). Scheduling a multi-product pipeline network. *Computers & Chemical Engineering*, 53, 55–69.

Fernandes, L. J., Relvas, S., & Barbosa-Póvoa, A. P. (2014). Collaborative design and tactical planning of downstream petroleum supply chains. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(44), 17155–17181.

Floudas, C. A., & Lin, X. (2004). Continuous-time versus discrete-time approaches for scheduling of chemical processes: a review. *Computers & Chemical Engineering*, 28(11), 2109–2129.

Gary, J. H., Handwerk, G. E., & Kaiser, M. J. (2007). *Petroleum refining: technology and economics*.

Hane, C. A., & Ratliff, H. D. (1995). Sequencing inputs to multi-commodity pipelines. *Annals of Operations Research*, 57(1), 73–101.

Hennig, F., Nygreen, B., Christiansen, M., Fagerholt, K., Furman, K. C., Song, J., Warrick, P. H. (2012). Maritime crude oil transportation—a split pickup and split delivery problem. *European Journal*

of Operational Research, 218(3), 764–774.

Herrán, A., De la Cruz, J. M., & De Andrés, B. (2010). A mathematical model for planning transportation of multiple petroleum products in a multi-pipeline system. *Computers & Chemical Engineering*, 34(3), 401–413.

Jia, Z., & Ierapetritou, M. (2003). Mixed-integer linear programming model for gasoline blending and distribution scheduling. *Industrial & Engineering Chemical Research*, 42, 825–835

Karuppiah, R., Furman, K. C., & Grossmann, I. E. (2008). Global optimization for scheduling refinery crude oil operations. *Computers & Chemical Engineering*, 32(11), 2745–2766.

Leffler, W. L. (1985). *Petroleum refining for the nontechnical person*

Magalhaes, M. V., & Shah, N. (2003). Crude oil scheduling. In *Proceedings of the 4th Conference on Foundations of Computer-Aided Process Operations*, 323–326.

Magatão, L., Arruda, L. V. R., & Nevesxe, F. (2005). Using CLP and MILP for scheduling commodities in a pipeline. *Computer Aided Chemical Engineering*, 20, 1027–1032.

Magatão, L., Arruda, L. V., & Neves, F. (2004). A mixed integer programming approach for scheduling commodities in a pipeline. *Computers & Chemical Engineering*, 28(1), 171–185.

Más, R., & Pinto, J. M. (2003). A mixed-integer optimization strategy for oil supply in distribution complexes. *Optimization and Engineering*, 4(1-2), 23–64.

MirHassani, S. A., & BeheshtiAsl, N. (2013). A heuristic batch sequencing for multiproduct pipelines. *Computers & Chemical Engineering*, 56, 58–67.

MirHassani, S. A., & Ghorbanalizadeh, M. (2008). The multi-product pipeline scheduling system. *Computers & Mathematics with Applications*, 56(4), 891–897.

MirHassani, S. A., & Jahromi, H. F. (2011). Scheduling multi-product tree-structure pipelines. *Computers & Chemical Engineering*, 35(1), 165–176.

Moro, L. F. L.; Pinto, J. M. Mixed-Integer Programming Approach for Short-Term Crude Oil Scheduling. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2004, 43, 85-94.

Moura, A. V., de Souza, C. C., Cire, A. A., & Lopes, T. M. (2008). Planning and scheduling the operation of a very large oil pipeline network. In *Principles and Practice of Constraint Programming*, 36–51.

Neves-Jr, F., Magatão, L., Stebel, S. L., Boschetto, S. N., Felizari, L. C., Czaikowski, D. I., Rocha, R., Ribas, P.C. (2007). An efficient approach to the operational scheduling of a real-world pipeline

network. *Computer Aided Chemical Engineering*, 24, 697–702.

Nnadili, B. N. (2006). *Supply and demand planning for crude oil procurement in refineries*.

Pinto, J. M., & Joly, M. (2000). Mixed integer programming techniques for the scheduling of fuel oil and asphalt production. *Computer Aided Chemical Engineering*, 8, 1063–1068.

Rejowski, R., & Pinto, J. M. (2003). Scheduling of a multiproduct pipeline system. *Computers & Chemical Engineering*, 27(8), 1229–1246.

Rejowski, R., & Pinto, J. M. (2004). Efficient MILP formulations and valid cuts for multiproduct pipeline scheduling. *Computers & Chemical Engineering*, 28(8), 1511–1528.

Rejowski, R., & Pinto, J. M. (2008). A novel continuous time representation for the scheduling of pipeline systems with pumping yield rate constraints. *Computers & Chemical Engineering*, 32(4), 1042–1066.

Relvas, S., Barbosa-Póvoa, A. P. F., & Matos, H. A. (2009). Heuristic batch sequencing on a multiproduct oil distribution system. *Computers & Chemical Engineering*, 33(3), 712–730.

Relvas, S., Magatão, S. N. B., Barbosa-Póvoa, A. P. F., & Neves, F. (2013). Integrated scheduling and inventory management of an oil products distribution system. *Omega*, 41(6), 955–968.

Relvas, S., Matos, H. A., Barbosa-Póvoa, A. P. F., & Fialho, J. (2007). Reactive scheduling framework for a multiproduct pipeline with inventory management. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 46(17), 5659–5672.

Relvas, S., Matos, H. A., Barbosa-Póvoa, A. P. F., Fialho, J., & Pinheiro, A. S. (2006). Pipeline scheduling and inventory management of a multiproduct distribution oil system. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 45(23), 7841–7855.

Rodrigue, J.-P., Comtois, C., & Slack, B. (2013). *The geography of transport systems*

Shah, N. (1996). Mathematical programming techniques for crude oil scheduling. *Computers & Chemical Engineering*, 20, 1227–1232.

Shah, N. K., Li, Z., & Ierapetritou, M. G. (2010). Petroleum refining operations: key issues, advances, and opportunities. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(3), 1161–1170

Speight, J. G. (2006). *The Chemistry and Technology of Petroleum*

The Robert S. Strauss Center (2008). Types of Tankers. Opgevraagd op 27 februari, 2016, via

<https://www.strausscenter.org/hormuz/types-of-tankers.html>

The World Factbook. (2016). Opgevraagd op 16 februari, 2016, via <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/>

Tzimas, E., Georgakaki, A., Garcia-Cortes, C., & Peteves, S. D. (2005). *Enhanced oil recovery using carbon dioxide in the European energy system*. Publications Office

Wauquier, J.-P. (1995). *Petroleum Refining: Crude oil, petroleum products, process flowsheets*

Workman, D. (2016). *Crude Oil Exports by Country*. Opgevraagd op 16 februari, 2016, via <http://www.worldstopexports.com/worlds-top-oil-exports-country/>

HOOFDSTUK 6: BIJLAGEN

6.1 Model LINGO

MODEL:

SETS:

```
LOT /1..6/: COMPLETION_TIME, PUMPING_TIME, VOLUME_OF_LOT;
PRODUCT /1..3/: BV_DC; !3 producten;
!PRODUCT /1..6/: BV_DC; !6 producten;
SEQUENCE_ALLOWED (PRODUCT, PRODUCT): MATCH;
PRODUCTION_SEQUENCE (LOT, PRODUCT): ALLOCATION, LS1, LS2;
!UPPER_VOL_COORDINATE (LOT, LOT) : UVC;
!VOL_IN_PIPELINE_THIS_ORDER (LOT, LOT) : VIP;
DISCHARGED (LOT, LOT): DIS;
VOL_LOTS /1..2/;
LOTS (PRODUCT, VOL_LOTS): MATCH_LOTS;
FRACTION_DISCHARGED (LOT, LOT, PRODUCT) : DV;
TOTAL_OF_EACH_PRODUCT_IN_DC (PRODUCT, LOT) : ID;
DAY /1..7/: TDEM ;
!DAY /1..10/: TDEM;
!DAY /1..14/: TDEM;
!DAY /1..28/: TDEM;
DEMAND_PRODUCT (PRODUCT, LOT) : QD;
DAY_IN_INTERVAL (LOT, DAY): DME, DMFINAL;
DEMAND_DAY (PRODUCT, DAY) : DEM;
!ALLOWED_TO_DISCHARGE (LOT, LOT) : X;
MAX_STORAGE_DC (PRODUCT) : IDMAX;
```

ENDSETS

DATA:

```
HMAX = 168; ! 7dagen;
!HMAX = 240; ! 10 dagen;
!HMAX = 336; ! 14 dagen;
!HMAX = 672; ! 28 dagen;
FLOW_RATE = 519;
MATCH = 0 1 1
        1 0 0
        1 0 0 ;

!MATCH = 0 1 1 1 0 0
         1 0 0 0 0 0
         1 0 0 1 1 0
         1 0 1 0 1 0
         0 0 1 1 0 1
         0 0 0 0 1 0;

DMAX = 21800;
SIGMA= 18000;
DMIN = 35;
MATCH_LOTS = 21800 18000
              16000 8000
              16000 8000 ; !3 producten, oorspronkelijke;
```

```

IDMAX = 81500 32000 27800; !3 producten;

!IDMAX = 81500 32000 24000 27800 10320 13120; !6 producten;

BV_DC = 52397 17565 19888 ; !3 producten;

!BV_DC = 52397 17565 18569 19888 10027 7309; !6 producten;

SSMIN = 0;
DEM = 7209 7209 7209 7209 7209 7209 7209          !3 producten 7 dagen;
      2361 2361 2361 2361 2361 2361 2361
      2483 2483 2483 2483 2483 2483 2483 ;

!DEM = 7209 7209 7209 7209 7209 7209 7209          !6 producten 7 dagen;
      ! 2361 2361 2361 2361 2361 2361 2361
      470  470  470  470  470  470  470  470
      2483 2483 2483 2483 2483 2483 2483
      350  350  350  350  350  350  350
      548  548  548  548  548  548  548 ;

!DEM = 7209 7209 7209 7209 7209 7209 7209 7209 7209 7209 7209 7209 7209 7209 !3 producten 14 dagen;
      !2361 2361 2361 2361 2361 2361 2361 2361 2361 2361 2361 2361 2361 2361
      2483 2483 2483 2483 2483 2483 2483 2483 2483 2483 2483 2483 2483 2483;

!DEM = 7209 7209 7209 7209 7209 7209 7209 7209 7209 7209 7209 7209 7209 7209          !6 producten 14 dagen;
      !2361 2361 2361 2361 2361 2361 2361 2361 2361 2361 2361 2361 2361 2361
      470  470  470  470  470  470  470  470  470  470  470  470  470  470  470
      2483 2483 2483 2483 2483 2483 2483 2483 2483 2483 2483 2483 2483 2483
      350  350  350  350  350  350  350  350  350  350  350  350  350  350
      548  548  548  548  548  548  548  548  548  548  548  548  548  548 ;

```

```

ENDDATA

!doelfunctie; MAX = (0.25*@SUM(LOT(I) : PUMPING_TIME(I))) + (0.75*@SUM(LOT(I) : VOLUME_OF_LOT(I))) ;

!(1); @FOR (LOT(I) | I #GT# 1: COMPLETION_TIME(I) - PUMPING_TIME(I) > COMPLETION_TIME(I-1));

!(2);@FOR (LOT(I) : PUMPING_TIME(I) < COMPLETION_TIME(I));

!(3);@FOR (LOT(I) : COMPLETION_TIME(I) < HMAX);

!(4);@FOR (LOT(I) : VOLUME_OF_LOT(I) = FLOW_RATE * PUMPING_TIME(I));

!(5);@FOR (LOT(I) | I #GT# 1:@FOR(PRODUCT(J1) : @FOR(PRODUCT(J2) : ALLOCATION(I-1,J1) + ALLOCATION(I,J2) < 1 + MATCH(J1,J2))));

!(6)@FOR (LOT(I) : @FOR (LOT(J) | J #GT# I: UVC(I+1,J)+ VIP(I,J) = UVC(I,J)));

!(7)@FOR (LOT(I) : VOLUME_OF_LOT(I) = VIP(I,I) + DIS(I,I));

!(8)@FOR (LOT(I) : UVC(I,I) = VIP(I,I));

!(9) @FOR (LOT(I) : @FOR (LOT(J) | J #GT# I: VIP(I,J) = VIP(I,J-1) - DIS(I,J)));

!(10)@FOR (LOT(I) : @FOR (LOT(J) | J #GT# I : DIS(I,J) < DMAX * X(I,J));

!(11)@FOR (LOT(I) : @FOR (LOT(J) | J #GT# I : UVC(I,J) > SIGMA * X(I,J));

!(12)@FOR (LOT(I) : @FOR (LOT(J) | J #GT# I #AND# J #GT# 1 #AND# I #LT# 15: UVC(I+1,J-1) < SIGMA - DIS(I,J));

!(13)@FOR (LOT(I) : @FOR (LOT(J) | J #GT# I: VIP(I,J-1) > DMIN * X(I,J));

!(14)@FOR (LOT(I) : @FOR (LOT(J) | J #GT# I: DIS(I,J) < VIP(I,J-1));

!(15) en (16) worden geskipt;

!(17);@FOR (LOT(I) : @SUM (PRODUCT (J) : ALLOCATION (I,J) = 1);

!(18);@FOR (LOT(I) : @FOR (PRODUCT(P) : LS1(I,P) + LS2(I,P) = ALLOCATION(I,P));

!(19);@FOR (LOT(I) : @SUM (PRODUCT(P) : LS1(I,P) * MATCH_LOTS(P,1) + LS2(I,P) * MATCH_LOTS(P,2) = VOLUME_OF_LOT(I));

!(20); @FOR (LOT(J) : @SUM (LOT(I) | J #GE# I : DIS(I,J) = VOLUME_OF_LOT(J));

!(21) wordt geskipt, gaat over de oude bestelling die nog in de pijplijn zit.;

!(22);@FOR (LOT(I) : @FOR (LOT(J) | J #GE# I : @FOR (PRODUCT(P) : DV(I,J,P) < DMAX * ALLOCATION(I,P)));

!(23);@FOR (LOT(I) : @FOR (LOT(J) | J #GE# I : @SUM (PRODUCT(P) : DV(I,J,P) = DIS(I,J));

!(24 pre); @FOR(PRODUCT(P) : ID(P,1) = BV_DC);

!(24);@FOR (LOT(J) | J #GT# 1 : @FOR (PRODUCT(P) : ID(P,J) = ID(P,J-1) + @SUM(LOT(I) | J #GE# I: DV(I,J,P) - QD(P,J));

!(25);@FOR (LOT(J) : @FOR (PRODUCT(P) : ID(P,J) < IDMAX));

!(26);@FOR (LOT(J) : @FOR (PRODUCT(P) : ID(P,J) > SSMIN * IDMAX));

!(voorbereiding);@FOR (DAY(K) : TDEM(K) = 24 * K);

!(27);@FOR (LOT(I) : @FOR (DAY(K) : COMPLETION_TIME(I) > TDEM(K) * DME (I,K));

!(28);@FOR (LOT(I) : @FOR (DAY(K) : COMPLETION_TIME(I) < TDEM(K) + HMAX * DME (I,K));

!(29);@FOR (LOT(I) | I #GT# 1: @FOR (DAY(K) : DMFINAL (I,K) = DME(I,K) - DME(I-1,K)) ;

!(30);@FOR (LOT(I) : @FOR (PRODUCT(P) : @SUM (DAY(K) : DEM(P,K) * DMFINAL(I,K) = QD(P,I));

!(31) tem (34) worden geskipt;

!(35);@FOR (DAY(K) : @SUM (LOT(I) : DMFINAL(I,K) = 1);

!(36);@FOR (LOT(I) : @FOR (DAY(K) | K #GT# 1: @SUM (LOT(J) | J #LE# I: DMFINAL(J,K) < @SUM (LOT(J) | J #LE# I: DMFINAL(J,K-1)));

! binaire omzetting;

@FOR (PRODUCTION_SEQUENCE: @BIN(ALLOCATION));

@FOR (PRODUCTION_SEQUENCE: @BIN(LS1));

@FOR (PRODUCTION_SEQUENCE: @BIN(LS2));

!@FOR (ALLOWED_TO_DISCHARGE: @BIN(X));

@FOR (DAY_IN_INTERVAL: @BIN(DME));

@FOR (DAY_IN_INTERVAL: @BIN(DMFINAL));

END

```

6.2 Output LINGO: voorbeeld 1

Global optimal solution found.			
Objective value:	165.7033		
Extended solver steps:	347		
Total solver iterations:	43617		
Variable	Value	Reduced Cost	
HMAX	168.0000	0.000000	
FLOW_RATE	519.0000	0.000000	
DMAX	21800.00	0.000000	
SIGMA	18000.00	0.000000	
DMIN	35.00000	0.000000	
SSMIN	0.000000	0.000000	
COMPLETION_TIME(1)	15.41426	0.000000	
COMPLETION_TIME(2)	50.09634	0.000000	
COMPLETION_TIME(3)	65.51060	0.000000	
COMPLETION_TIME(4)	100.1927	0.000000	
COMPLETION_TIME(5)	131.0212	0.000000	
COMPLETION_TIME(6)	168.0000	0.000000	
PUMPING_TIME(1)	15.41426	0.000000	
PUMPING_TIME(2)	34.68208	0.000000	
PUMPING_TIME(3)	15.41426	0.000000	
PUMPING_TIME(4)	34.68208	0.000000	
PUMPING_TIME(5)	30.82852	0.000000	
PUMPING_TIME(6)	34.68208	0.000000	
VOLUME_OF_LOT(1)	8000.000	0.000000	
VOLUME_OF_LOT(2)	18000.00	0.000000	
VOLUME_OF_LOT(3)	8000.000	0.000000	
VOLUME_OF_LOT(4)	18000.00	0.000000	
VOLUME_OF_LOT(5)	16000.00	0.000000	
VOLUME_OF_LOT(6)	18000.00	0.000000	
BV_DC(1)	52397.00	0.000000	
BV_DC(2)	17565.00	0.000000	
BV_DC(3)	19888.00	0.000000	
MATCH(1, 1)	0.000000	0.000000	
MATCH(1, 2)	1.000000	0.000000	
MATCH(1, 3)	1.000000	0.000000	
MATCH(2, 1)	1.000000	0.000000	
MATCH(2, 2)	0.000000	0.000000	

MATCH(2, 3)	0.000000	0.000000	
MATCH(3, 1)	1.000000	0.000000	
MATCH(3, 2)	0.000000	0.000000	
MATCH(3, 3)	0.000000	0.000000	
ALLOCATION(1, 1)	0.000000	0.000000	
ALLOCATION(1, 2)	1.000000	0.000000	
ALLOCATION(1, 3)	0.000000	0.000000	
ALLOCATION(2, 1)	1.000000	0.000000	
ALLOCATION(2, 2)	0.000000	0.000000	
ALLOCATION(2, 3)	0.000000	0.000000	
ALLOCATION(3, 1)	0.000000	0.000000	
ALLOCATION(3, 2)	1.000000	0.000000	
ALLOCATION(3, 3)	0.000000	0.000000	
ALLOCATION(4, 1)	1.000000	0.000000	
ALLOCATION(4, 2)	0.000000	0.000000	
ALLOCATION(4, 3)	0.000000	0.000000	
ALLOCATION(5, 1)	0.000000	0.000000	
ALLOCATION(5, 2)	1.000000	0.000000	
ALLOCATION(5, 3)	0.000000	0.000000	
ALLOCATION(6, 1)	1.000000	0.000000	
ALLOCATION(6, 2)	0.000000	0.000000	
ALLOCATION(6, 3)	0.000000	0.000000	
LS1(1, 1)	0.000000	-42.00385	
LS1(1, 2)	0.000000	-30.82852	
LS1(1, 3)	0.000000	-30.82852	
LS1(2, 1)	0.000000	-42.00385	
LS1(2, 2)	0.000000	-30.82852	
LS1(2, 3)	0.000000	-30.82852	
LS1(3, 1)	0.000000	-42.00385	
LS1(3, 2)	0.000000	-30.82852	
LS1(3, 3)	0.000000	-30.82852	
LS1(4, 1)	0.000000	-42.00385	
LS1(4, 2)	0.000000	-30.82852	
LS1(4, 3)	0.000000	-30.82852	
LS1(5, 1)	0.000000	-42.00385	
LS1(5, 2)	1.000000	-30.82852	
LS1(5, 3)	0.000000	-30.82852	
LS1(6, 1)	0.000000	-42.00385	
LS1(6, 2)	0.000000	-30.82852	

LS2(6, 3)	0.000000	-15.41426
UVC(1, 1)	0.000000	0.000000
UVC(1, 2)	0.000000	0.000000
UVC(1, 3)	0.000000	0.000000
UVC(1, 4)	0.000000	0.000000
UVC(1, 5)	0.000000	0.000000
UVC(1, 6)	0.000000	0.000000
UVC(2, 1)	0.000000	0.000000
UVC(2, 2)	0.000000	0.000000
UVC(2, 3)	0.000000	0.000000
UVC(2, 4)	0.000000	0.000000
UVC(2, 5)	0.000000	0.000000
UVC(2, 6)	0.000000	0.000000
UVC(3, 1)	0.000000	0.000000
UVC(3, 2)	0.000000	0.000000
UVC(3, 3)	0.000000	0.000000
UVC(3, 4)	0.000000	0.000000
UVC(3, 5)	0.000000	0.000000
UVC(3, 6)	0.000000	0.000000
UVC(4, 1)	0.000000	0.000000
UVC(4, 2)	0.000000	0.000000
UVC(4, 3)	0.000000	0.000000
UVC(4, 4)	0.000000	0.000000
UVC(4, 5)	0.000000	0.000000
UVC(4, 6)	0.000000	0.000000
UVC(5, 1)	0.000000	0.000000
UVC(5, 2)	0.000000	0.000000
UVC(5, 3)	0.000000	0.000000
UVC(5, 4)	0.000000	0.000000
UVC(5, 5)	0.000000	0.000000
UVC(5, 6)	0.000000	0.000000
UVC(6, 1)	0.000000	0.000000
UVC(6, 2)	0.000000	0.000000
UVC(6, 3)	0.000000	0.000000
UVC(6, 4)	0.000000	0.000000
UVC(6, 5)	0.000000	0.000000
UVC(6, 6)	0.000000	0.000000
VIP(1, 1)	0.000000	0.000000
VIP(1, 2)	0.000000	0.000000

VIP(1, 3)	0.000000	0.000000
VIP(1, 4)	0.000000	0.000000
VIP(1, 5)	0.000000	0.000000
VIP(1, 6)	0.000000	0.000000
VIP(2, 1)	0.000000	0.000000
VIP(2, 2)	0.000000	0.000000
VIP(2, 3)	0.000000	0.000000
VIP(2, 4)	0.000000	0.000000
VIP(2, 5)	0.000000	0.000000
VIP(2, 6)	0.000000	0.000000
VIP(3, 1)	0.000000	0.000000
VIP(3, 2)	0.000000	0.000000
VIP(3, 3)	0.000000	0.000000
VIP(3, 4)	0.000000	0.000000
VIP(3, 5)	0.000000	0.000000
VIP(3, 6)	0.000000	0.000000
VIP(4, 1)	0.000000	0.000000
VIP(4, 2)	0.000000	0.000000
VIP(4, 3)	0.000000	0.000000
VIP(4, 4)	0.000000	0.000000
VIP(4, 5)	0.000000	0.000000
VIP(4, 6)	0.000000	0.000000
VIP(5, 1)	0.000000	0.000000
VIP(5, 2)	0.000000	0.000000
VIP(5, 3)	0.000000	0.000000
VIP(5, 4)	0.000000	0.000000
VIP(5, 5)	0.000000	0.000000
VIP(5, 6)	0.000000	0.000000
VIP(6, 1)	0.000000	0.000000
VIP(6, 2)	0.000000	0.000000
VIP(6, 3)	0.000000	0.000000
VIP(6, 4)	0.000000	0.000000
VIP(6, 5)	0.000000	0.000000
VIP(6, 6)	0.000000	0.000000
DIS(1, 1)	8000.000	0.000000
DIS(1, 2)	0.000000	0.000000
DIS(1, 3)	0.000000	0.000000
DIS(1, 4)	0.000000	0.000000
DIS(1, 5)	0.000000	0.000000

DIS(1, 6)	0.000000	0.000000
DIS(2, 1)	0.000000	0.000000
DIS(2, 2)	18000.00	0.000000
DIS(2, 3)	0.000000	0.000000
DIS(2, 4)	0.000000	0.000000
DIS(2, 5)	0.000000	0.000000
DIS(2, 6)	0.000000	0.000000
DIS(3, 1)	0.000000	0.000000
DIS(3, 2)	0.000000	0.000000
DIS(3, 3)	8000.000	0.000000
DIS(3, 4)	0.000000	0.000000
DIS(3, 5)	0.000000	0.000000
DIS(3, 6)	0.000000	0.000000
DIS(4, 1)	0.000000	0.000000
DIS(4, 2)	0.000000	0.000000
DIS(4, 3)	0.000000	0.000000
DIS(4, 4)	18000.00	0.000000
DIS(4, 5)	0.000000	0.000000
DIS(4, 6)	0.000000	0.000000
DIS(5, 1)	0.000000	0.000000
DIS(5, 2)	0.000000	0.000000
DIS(5, 3)	0.000000	0.000000
DIS(5, 4)	0.000000	0.000000
DIS(5, 5)	16000.00	0.000000
DIS(5, 6)	0.000000	0.000000
DIS(6, 1)	0.000000	0.000000
DIS(6, 2)	0.000000	0.000000
DIS(6, 3)	0.000000	0.000000
DIS(6, 4)	0.000000	0.000000
DIS(6, 5)	0.000000	0.000000
DIS(6, 6)	18000.00	0.000000
MATCH_LOTS(1, 1)	21800.00	0.000000
MATCH_LOTS(1, 2)	18000.00	0.000000
MATCH_LOTS(2, 1)	16000.00	0.000000
MATCH_LOTS(2, 2)	8000.000	0.000000
MATCH_LOTS(3, 1)	16000.00	0.000000
MATCH_LOTS(3, 2)	8000.000	0.000000
DV(1, 1, 1)	0.000000	0.000000
DV(1, 1, 2)	8000.000	0.000000

DV(1, 1, 3)	0.000000	0.000000
DV(1, 2, 1)	0.000000	0.000000
DV(1, 2, 2)	0.000000	0.000000
DV(1, 2, 3)	0.000000	0.000000
DV(1, 3, 1)	0.000000	0.000000
DV(1, 3, 2)	0.000000	0.000000
DV(1, 3, 3)	0.000000	0.000000
DV(1, 4, 1)	0.000000	0.000000
DV(1, 4, 2)	0.000000	0.000000
DV(1, 4, 3)	0.000000	0.000000
DV(1, 5, 1)	0.000000	0.000000
DV(1, 5, 2)	0.000000	0.000000
DV(1, 5, 3)	0.000000	0.000000
DV(1, 6, 1)	0.000000	0.000000
DV(1, 6, 2)	0.000000	0.000000
DV(1, 6, 3)	0.000000	0.000000
DV(2, 1, 1)	0.000000	0.000000
DV(2, 1, 2)	0.000000	0.000000
DV(2, 1, 3)	0.000000	0.000000
DV(2, 2, 1)	18000.00	0.000000
DV(2, 2, 2)	0.000000	0.000000
DV(2, 2, 3)	0.000000	0.000000
DV(2, 3, 1)	0.000000	0.000000
DV(2, 3, 2)	0.000000	0.000000
DV(2, 3, 3)	0.000000	0.000000
DV(2, 4, 1)	0.000000	0.000000
DV(2, 4, 2)	0.000000	0.000000
DV(2, 4, 3)	0.000000	0.000000
DV(2, 5, 1)	0.000000	0.000000
DV(2, 5, 2)	0.000000	0.000000
DV(2, 5, 3)	0.000000	0.000000
DV(2, 6, 1)	0.000000	0.000000
DV(2, 6, 2)	0.000000	0.000000
DV(2, 6, 3)	0.000000	0.000000
DV(3, 1, 1)	0.000000	0.000000
DV(3, 1, 2)	0.000000	0.000000
DV(3, 1, 3)	0.000000	0.000000
DV(3, 2, 1)	0.000000	0.000000
DV(3, 2, 2)	0.000000	0.000000

DV(3, 2, 3)	0.000000	0.000000
DV(3, 3, 1)	0.000000	0.000000
DV(3, 3, 2)	8000.000	0.000000
DV(3, 3, 3)	0.000000	0.000000
DV(3, 4, 1)	0.000000	0.000000
DV(3, 4, 2)	0.000000	0.000000
DV(3, 4, 3)	0.000000	0.000000
DV(3, 5, 1)	0.000000	0.000000
DV(3, 5, 2)	0.000000	0.000000
DV(3, 5, 3)	0.000000	0.000000
DV(3, 6, 1)	0.000000	0.000000
DV(3, 6, 2)	0.000000	0.000000
DV(3, 6, 3)	0.000000	0.000000
DV(4, 1, 1)	0.000000	0.000000
DV(4, 1, 2)	0.000000	0.000000
DV(4, 1, 3)	0.000000	0.000000
DV(4, 2, 1)	0.000000	0.000000
DV(4, 2, 2)	0.000000	0.000000
DV(4, 2, 3)	0.000000	0.000000
DV(4, 3, 1)	0.000000	0.000000
DV(4, 3, 2)	0.000000	0.000000
DV(4, 3, 3)	0.000000	0.000000
DV(4, 4, 1)	18000.00	0.000000
DV(4, 4, 2)	0.000000	0.000000
DV(4, 4, 3)	0.000000	0.000000
DV(4, 5, 1)	0.000000	0.000000
DV(4, 5, 2)	0.000000	0.000000
DV(4, 5, 3)	0.000000	0.000000
DV(4, 6, 1)	0.000000	0.000000
DV(4, 6, 2)	0.000000	0.000000
DV(4, 6, 3)	0.000000	0.000000
DV(5, 1, 1)	0.000000	0.000000
DV(5, 1, 2)	0.000000	0.000000
DV(5, 1, 3)	0.000000	0.000000
DV(5, 2, 1)	0.000000	0.000000
DV(5, 2, 2)	0.000000	0.000000
DV(5, 2, 3)	0.000000	0.000000
DV(5, 3, 1)	0.000000	0.000000
DV(5, 3, 2)	0.000000	0.000000

DV(5, 3, 3)	0.000000	0.000000
DV(5, 4, 1)	0.000000	0.000000
DV(5, 4, 2)	0.000000	0.000000
DV(5, 4, 3)	0.000000	0.000000
DV(5, 5, 1)	0.000000	0.000000
DV(5, 5, 2)	16000.00	0.000000
DV(5, 5, 3)	0.000000	0.000000
DV(5, 6, 1)	0.000000	0.000000
DV(5, 6, 2)	0.000000	0.000000
DV(5, 6, 3)	0.000000	0.000000
DV(6, 1, 1)	0.000000	0.000000
DV(6, 1, 2)	0.000000	0.000000
DV(6, 1, 3)	0.000000	0.000000
DV(6, 2, 1)	0.000000	0.000000
DV(6, 2, 2)	0.000000	0.000000
DV(6, 2, 3)	0.000000	0.000000
DV(6, 3, 1)	0.000000	0.000000
DV(6, 3, 2)	0.000000	0.000000
DV(6, 3, 3)	0.000000	0.000000
DV(6, 4, 1)	0.000000	0.000000
DV(6, 4, 2)	0.000000	0.000000
DV(6, 4, 3)	0.000000	0.000000
DV(6, 5, 1)	0.000000	0.000000
DV(6, 5, 2)	0.000000	0.000000
DV(6, 5, 3)	0.000000	0.000000
DV(6, 6, 1)	18000.00	0.000000
DV(6, 6, 2)	0.000000	0.000000
DV(6, 6, 3)	0.000000	0.000000
ID(1, 1)	52397.00	0.000000
ID(1, 2)	55979.00	0.000000
ID(1, 3)	55979.00	0.000000
ID(1, 4)	59561.00	0.000000
ID(1, 5)	52352.00	0.000000
ID(1, 6)	55934.00	0.000000
ID(2, 1)	17565.00	0.000000
ID(2, 2)	12843.00	0.000000
ID(2, 3)	20843.00	0.000000
ID(2, 4)	16121.00	0.000000
ID(2, 5)	29760.00	0.000000

ID(2, 6)	25038.00	0.000000
ID(3, 1)	19888.00	0.000000
ID(3, 2)	14922.00	0.000000
ID(3, 3)	14922.00	0.000000
ID(3, 4)	9956.000	0.000000
ID(3, 5)	7473.000	0.000000
ID(3, 6)	2507.000	0.000000
TDEM(1)	24.00000	0.000000
TDEM(2)	48.00000	0.000000
TDEM(3)	72.00000	0.000000
TDEM(4)	96.00000	0.000000
TDEM(5)	120.0000	0.000000
TDEM(6)	144.0000	0.000000
TDEM(7)	168.0000	0.000000
QD(1, 1)	0.000000	0.000000
QD(1, 2)	14418.00	0.000000
QD(1, 3)	0.000000	0.000000
QD(1, 4)	14418.00	0.000000
QD(1, 5)	7209.000	0.000000
QD(1, 6)	14418.00	0.000000
QD(2, 1)	0.000000	0.000000
QD(2, 2)	4722.000	0.000000
QD(2, 3)	0.000000	0.000000
QD(2, 4)	4722.000	0.000000
QD(2, 5)	2361.000	0.000000
QD(2, 6)	4722.000	0.000000
QD(3, 1)	0.000000	0.000000
QD(3, 2)	4966.000	0.000000
QD(3, 3)	0.000000	0.000000
QD(3, 4)	4966.000	0.000000
QD(3, 5)	2483.000	0.000000
QD(3, 6)	4966.000	0.000000
DME(1, 1)	0.000000	0.000000
DME(1, 2)	0.000000	0.000000
DME(1, 3)	0.000000	0.000000
DME(1, 4)	0.000000	0.000000
DME(1, 5)	0.000000	0.000000
DME(1, 6)	0.000000	0.000000
DME(1, 7)	0.000000	0.000000

DME(2, 1)	1.000000	0.000000
DME(2, 2)	1.000000	0.000000
DME(2, 3)	0.000000	0.000000
DME(2, 4)	0.000000	0.000000
DME(2, 5)	0.000000	0.000000
DME(2, 6)	0.000000	0.000000
DME(2, 7)	0.000000	0.000000
DME(3, 1)	1.000000	0.000000
DME(3, 2)	1.000000	0.000000
DME(3, 3)	0.000000	0.000000
DME(3, 4)	0.000000	0.000000
DME(3, 5)	0.000000	0.000000
DME(3, 6)	0.000000	0.000000
DME(3, 7)	0.000000	0.000000
DME(4, 1)	1.000000	0.000000
DME(4, 2)	1.000000	0.000000
DME(4, 3)	1.000000	0.000000
DME(4, 4)	1.000000	0.000000
DME(4, 5)	0.000000	0.000000
DME(4, 6)	0.000000	0.000000
DME(4, 7)	0.000000	0.000000
DME(5, 1)	1.000000	0.000000
DME(5, 2)	1.000000	0.000000
DME(5, 3)	1.000000	0.000000
DME(5, 4)	1.000000	0.000000
DME(5, 5)	1.000000	0.000000
DME(5, 6)	0.000000	0.000000
DME(5, 7)	0.000000	0.000000
DME(6, 1)	1.000000	0.000000
DME(6, 2)	1.000000	0.000000
DME(6, 3)	1.000000	0.000000
DME(6, 4)	1.000000	0.000000
DME(6, 5)	1.000000	0.000000
DME(6, 6)	1.000000	0.000000
DME(6, 7)	1.000000	0.000000
DMFINAL(1, 1)	0.000000	0.000000
DMFINAL(1, 2)	0.000000	0.000000
DMFINAL(1, 3)	0.000000	0.000000
DMFINAL(1, 4)	0.000000	0.000000

DMFINAL(1, 5)	0.000000	0.000000
DMFINAL(1, 6)	0.000000	0.000000
DMFINAL(1, 7)	0.000000	0.000000
DMFINAL(2, 1)	1.000000	0.000000
DMFINAL(2, 2)	1.000000	0.000000
DMFINAL(2, 3)	0.000000	0.000000
DMFINAL(2, 4)	0.000000	0.000000
DMFINAL(2, 5)	0.000000	0.000000
DMFINAL(2, 6)	0.000000	0.000000
DMFINAL(2, 7)	0.000000	0.000000
DMFINAL(3, 1)	0.000000	0.000000
DMFINAL(3, 2)	0.000000	0.000000
DMFINAL(3, 3)	0.000000	0.000000
DMFINAL(3, 4)	0.000000	0.000000
DMFINAL(3, 5)	0.000000	0.000000
DMFINAL(3, 6)	0.000000	0.000000
DMFINAL(3, 7)	0.000000	0.000000
DMFINAL(4, 1)	0.000000	0.000000
DMFINAL(4, 2)	0.000000	0.000000
DMFINAL(4, 3)	1.000000	0.000000
DMFINAL(4, 4)	1.000000	0.000000
DMFINAL(4, 5)	0.000000	0.000000
DMFINAL(4, 6)	0.000000	0.000000
DMFINAL(4, 7)	0.000000	0.000000
DMFINAL(5, 1)	0.000000	0.000000
DMFINAL(5, 2)	0.000000	0.000000
DMFINAL(5, 3)	0.000000	0.000000
DMFINAL(5, 4)	0.000000	0.000000
DMFINAL(5, 5)	1.000000	0.000000
DMFINAL(5, 6)	0.000000	0.000000
DMFINAL(5, 7)	0.000000	0.000000
DMFINAL(6, 1)	0.000000	0.000000
DMFINAL(6, 2)	0.000000	0.000000
DMFINAL(6, 3)	0.000000	0.000000
DMFINAL(6, 4)	0.000000	0.000000
DMFINAL(6, 5)	0.000000	0.000000
DMFINAL(6, 6)	1.000000	0.000000
DMFINAL(6, 7)	1.000000	0.000000
DEM(1, 1)	7209.000	0.000000

DEM(1, 2)	7209.000	0.000000
DEM(1, 3)	7209.000	0.000000
DEM(1, 4)	7209.000	0.000000
DEM(1, 5)	7209.000	0.000000
DEM(1, 6)	7209.000	0.000000
DEM(1, 7)	7209.000	0.000000
DEM(2, 1)	2361.000	0.000000
DEM(2, 2)	2361.000	0.000000
DEM(2, 3)	2361.000	0.000000
DEM(2, 4)	2361.000	0.000000
DEM(2, 5)	2361.000	0.000000
DEM(2, 6)	2361.000	0.000000
DEM(2, 7)	2361.000	0.000000
DEM(3, 1)	2483.000	0.000000
DEM(3, 2)	2483.000	0.000000
DEM(3, 3)	2483.000	0.000000
DEM(3, 4)	2483.000	0.000000
DEM(3, 5)	2483.000	0.000000
DEM(3, 6)	2483.000	0.000000
DEM(3, 7)	2483.000	0.000000
X(1, 1)	0.000000	0.000000
X(1, 2)	0.000000	0.000000
X(1, 3)	0.000000	0.000000
X(1, 4)	0.000000	0.000000
X(1, 5)	0.000000	0.000000
X(1, 6)	0.000000	0.000000
X(2, 1)	0.000000	0.000000
X(2, 2)	0.000000	0.000000
X(2, 3)	0.000000	0.000000
X(2, 4)	0.000000	0.000000
X(2, 5)	0.000000	0.000000
X(2, 6)	0.000000	0.000000
X(3, 1)	0.000000	0.000000
X(3, 2)	0.000000	0.000000
X(3, 3)	0.000000	0.000000
X(3, 4)	0.000000	0.000000
X(3, 5)	0.000000	0.000000
X(3, 6)	0.000000	0.000000
X(4, 1)	0.000000	0.000000

X(1, 5)	0.000000	0.000000
X(1, 6)	0.000000	0.000000
X(2, 1)	0.000000	0.000000
X(2, 2)	0.000000	0.000000
X(2, 3)	0.000000	0.000000
X(2, 4)	0.000000	0.000000
X(2, 5)	0.000000	0.000000
X(2, 6)	0.000000	0.000000
X(3, 1)	0.000000	0.000000
X(3, 2)	0.000000	0.000000
X(3, 3)	0.000000	0.000000
X(3, 4)	0.000000	0.000000
X(3, 5)	0.000000	0.000000
X(3, 6)	0.000000	0.000000
X(4, 1)	0.000000	0.000000
X(4, 2)	0.000000	0.000000
X(4, 3)	0.000000	0.000000
X(4, 4)	0.000000	0.000000
X(4, 5)	0.000000	0.000000
X(4, 6)	0.000000	0.000000
X(5, 1)	0.000000	0.000000
X(5, 2)	0.000000	0.000000
X(5, 3)	0.000000	0.000000
X(5, 4)	0.000000	0.000000
X(5, 5)	0.000000	0.000000
X(5, 6)	0.000000	0.000000
X(6, 1)	0.000000	0.000000
X(6, 2)	0.000000	0.000000
X(6, 3)	0.000000	0.000000
X(6, 4)	0.000000	0.000000
X(6, 5)	0.000000	0.000000
X(6, 6)	0.000000	0.000000
IDMAX(1)	81500.00	0.000000
IDMAX(2)	32000.00	0.000000
IDMAX(3)	27800.00	0.000000

Auteursrechtelijke overeenkomst

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

Distributieplanning en voorraadbeheer voor het transport van olieproducten via een pijplijn

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

Jaar: **2016**

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,

Mechelmans, Simon

Datum: **1/06/2016**