

Promotor: Prof. Erik Demeulemeester

Werkleider: Brecht Cardoen

2008-2009

From location-dependent to margin-dependent central capacity planning: a case-study

Ruth Evers

H.Ir.,

Faculteit Economie en Bedrijfswetenschappen, Katholieke Universiteit Leuven

More and more enterprises have factories at geographically scattered locations. This allows them to be closer to their customers, to react more quickly to changes in the market, to adapt their marketing better to the client and to pay lower wages. This shift from production in one factory to production in several factories makes the production-planning a more complex matter than it used to be. In this masterproof the following assignment and planning problem will be studied: given a number of orders, decide which orders will be assigned to which factory and plan the assignment of orders to the factories so that the profit will be optimised. An IP-formulation of the problem will be formulated and will be solved optimally with ILOG CPLEX. Moreover, small adaptations to the data and the model will be carried out in order to analyse their influence on the profit.

Keywords: distributed planning, multi-factory production, production planning

Van locatieafhankelijke naar margeafhankelijke centrale capaciteitsplanning: een case-study

Ruth Evers

H.Ir.,

Faculteit Economie en Bedrijfswetenschappen, Katholieke Universiteit Leuven

Steeds meer ondernemingen hebben vestigingen op geografisch verspreide locaties. Dit laat hen toe dichter bij hun klanten te zijn, sneller te reageren op veranderingen in de markt, hun marketing beter af te stemmen op de klant en lagere lonen te betalen. Deze verschuiving van productie in één fabriek naar productie in meerdere fabrieken maakt van de productieplanning een complexere aangelegenheid dan

Promotor: Prof. Erik Demeulemeester

Werkleider: Brecht Cardoen

2008-2009

het oorspronkelijk was. In deze meesterproef wordt het volgende toewijzings- en planningsprobleem bestudeerd: gegeven een geheel van orders, bepaal welke orders aan welke fabriek toegewezen worden en plan de toewijzing van de orders in de fabriek zodat de winst geoptimaliseerd wordt. Een IP-formulering van het probleem wordt opgesteld en wordt optimaal opgelost met behulp van ILOG CPLEX. Verder worden kleine aanpassingen aan het model en de data doorgevoerd teneinde de invloed hiervan te analyseren.

Kernwoorden: gedistribueerde planning, multi-fabriek productie, productieplanning

1. Inleiding

Een productieprobleem van een vloerenfabrikant ligt aan de basis van deze meesterproef. De onderneming produceert vloerelementen die kunnen verschillen naargelang het vereiste type wapening, de familie waartoe ze behoren, hun dikte en hun lengte. In de loop der jaren heeft de onderneming haar activiteiten zowel nationaal als internationaal uitgebreid door de oprichting van nieuwe vestigingen of door de overname van bestaande productiebedrijven dichterbij de afzetgebieden. Deze fabrieken verschillen van elkaar inzake lay-out, productiviteit en kostenstructuur. Het doel van deze meesterproef bestaat enerzijds in de bepaling van de beste toewijzing van de orders aan de fabrieken en anderzijds in de opstelling van het corresponderende productieplan voor elke fabriek. Dit wordt niet opgevat als een sequentieel proces waarin in een eerste stap de orders toegewezen worden aan de fabrieken en in een tweede stap de orders, die toegewezen zijn aan de fabriek, toegewezen worden aan de productie-eenheden van deze fabriek. Het sequentieel oplossen van dit probleem zal immers resulteren in een inefficiënt gebruik van de bedrijfsmiddelen, problemen van over- en ondercapaciteit van fabrieken, en een onnodig lange productietijd met als mogelijk gevolg het niet halen van de *due date* van een order. Kortom, een suboptimaal resultaat. Vandaar dat ervoor gekozen is beide stappen simultaan te optimaliseren in deze meesterproef.

Promotor: Prof. Erik Demeulemeester

Werkleider: Brecht Cardoen

2008-2009

1.1Achtergrond

De onderneming produceert betonnen vloerelementen. Vloerelementen zijn geprefabriceerde holle betonplaten die als draagvloer worden gebruikt in zowel de woningbouw als de utiliteitsbouw. De platen overspannen de ruimte tussen twee draagmuren en worden met elkaar gesolidariseerd via het aanstorten van de geprofileerde voegen. De fabrieksmatig aangebrachte kanalen verklaren de term “holle” vloerelementen en dragen op een efficiënte manier bij tot materiaal- en gewichtsbesparing zonder verlies aan draagvermogen. De vloerelementen kunnen opgedeeld worden in twee grote productgroepen. Op basis van het al dan niet vooraf activeren (rekken) van het wapeningsstaal worden vloerelementen in gewapend beton en elementen in voorgespannen beton onderscheiden. De focus zal in deze meesterproef liggen op de vloerelementen in voorgespannen beton. De voorgespannen vloerelementen worden vervaardigd op lange banen van 126 meter met spanhoofden aan de uiteinden. Met behulp van deze spanhoofden wordt de wapening, bestaande uit draden of strengen, uitgerekt tot een bepaalde spanning (ongeveer 60 % van de treksterkte van de wapening). Eenmaal het beton dat rond deze draden of strengen gestort wordt uitgehard is, wordt de trekspanning van de wapening als drukspanning overgedragen op het beton. Hierdoor blijft de betondoorsnede op druk belast, zelfs bij grote verticale belastingen op het element. Gezien beton beter kan weerstaan aan drukspanningen dan aan trekspanningen, voorkomt de voorspanning (al te snelle) doorbuiging en scheurvorming. Met voorgespannen vloerelementen zijn bijgevolg grotere overspanningen en belastingen mogelijk dan bij gewapende vloerelementen.

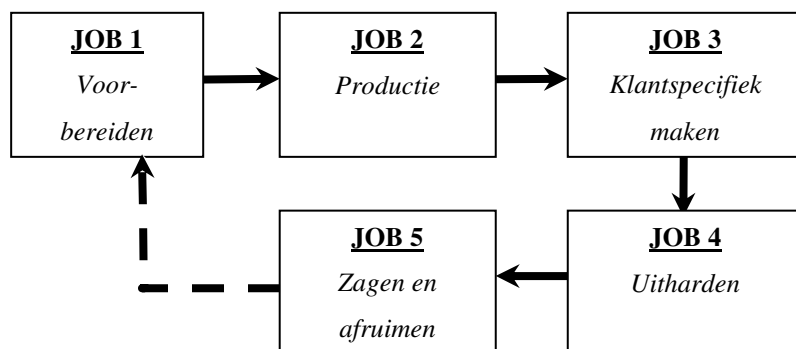
Het productieproces van voorgespannen vloeren gebeurt in een gesloten hal op parallel lopende metalen productiebanen met een breedte van 1,20 m. De banen hebben een lengte die minimaal 126 m bedraagt en in sommige vestigingen oploopt tot 150 m. Zij vormen de bekistingsmal voor de gladde onderzijde van de vloerelementen en worden begrensd door spoorlopers waarover de productiemachines bewegen. Het ene uiteinde van de baan wordt “ankerzijde” genoemd (de zijde waar de voorspandraden verankerd worden), het andere uiteinde heet “spanzijde” (daar waar de draden

Promotor: Prof. Erik Demeulemeester

Werkleider: Brecht Cardoen

2008-2009

aangespannen worden). Het produceren van de vloerelementen is in theorie op te vatten als een cyclisch proces dat via een aantal fasen verloopt. Figuur 1 brengt het proces grafisch in beeld.



Figuur 1: Fabricageproces voorgespanssen beton

Voorbereiden. De fase van het voorbereiden bestaat uit alle activiteiten die moeten gebeuren om de productiebanen productieklaar te maken. Achtereenvolgens wordt onderscheiden het reinigen van de baan om alle betonresten te verwijderen, het aanbrengen van de ontkistingsolie op de baan en het trekken en aanspannen van de voerspandraden.

Storten (produceren). In de stortfase worden de gespannen draden of strengen omgoten met beton door het inzetten van een glijbekistingsmachine die zich van ankerzijde naar spanzijde over de baan beweegt. Het betonmengsel, bestaande uit zand, cement, grind, water en additieven, wordt aangemaakt door een centrale industriële menger en tot aan de glijbekistingsmachine gebracht met behulp van kubelbruggen. Dit zijn rolbruggen die uitgerust zijn met een stortbak en in lengterichting door de hal bewegen. In die gevallen waar de centrale betonmenger meer dan één productiehal bedient, wordt het beton in dwarsrichting getransporteerd van de menginstallatie naar de kubelbrug voor de betrokken hal. Dit transversale transport wordt verzorgd door een dwarskubelbrug.

Klantspecifiek maken. Een vijftal minuten na de start van de productie wordt een aanvang genomen met het klant- of projectspecifiek maken van het gestorte vloertype. Daartoe worden drie machines ingezet: een al dan niet geautomatiseerd aftekenapparaat, een frisbetonzaag en een betonzuiger. Met behulp van het aftekenapparaat worden de geometrische contouren van ieder vloerelement en eventuele bijkomende specificaties aangegeven. Vloerelementen met een breedte

Promotor: Prof. Erik Demeulemeester

Werkleider: Brecht Cardoen

2008-2009

kleiner dan 1,20 m (pasplaten) worden door de frisbetonzaag op de aangegeven breedtemaat in lengterichting uit het nog natte beton gezaagd. De overige afgetekende specificaties (open kanalen, uitstekende wapening, sparingen, e.d.) worden gemaakt met behulp van een betonzuiger.

Het aantal uit te voeren bewerkingen zal de tijd bepalen tussen het einde van de stortfase en deze fase. Gemiddeld bedraagt deze finish-finish¹ relatie vijf minuten.

Uitharden. De vloerelementen kunnen pas verzaagd en afgeruimd worden nadat ze zijn uitgehard. De uithardingsfase neemt onder normale productie-omstandigheden het meeste tijd in beslag. De uithardingstijd is afhankelijk van de betondruksterkte die moet bereikt zijn op het moment van het aanbrengen van de voorspanning. De gewenste betondruksterkte wordt bepaald in functie van de over te brengen voorspankracht (hoeveelheid voorspanwapening) en de dikte van de vloerelementen. De uithardingstijd kan worden beïnvloed door het cementtype, de baantemperatuur en de eventueel toegevoegde additieven.

Zagen en afruimen. In deze fase wordt de voorspanning overgebracht op de vloerelementen door het knippen van de spandraden aan ankerzijde. Aansluitend worden de elementen op de gewenste lengte gezaagd. Vervolgens worden ze met de takelbrug van de baan genomen en gestapeld op rolpaletten of trucks.

De opbouw van deze meesterproef ziet er als volgt uit: in de tweede sectie wordt de probleemstelling geformuleerd en een literatuuroverzicht gegeven. In de derde sectie wordt vervolgens de gebruikte methode voor de berekening van de benodigde data afgeleid en wordt aangegeven hoe deze data verschillen over de verschillende fabrieken en over de verschillende types elementen. In de vierde sectie wordt het IP-model opgesteld om het probleem optimaal op te lossen en worden tevens kleine variaties van het model voorgesteld. In de vijfde sectie worden de bekomen resultaten besproken en in de zesde sectie wordt ten slotte de conclusie geformuleerd.

¹ Finish A - finish B=n betekent dat activiteit B niet eerder kan eindigen dan n minuten na het einde van activiteit A.

Promotor: *Prof. Erik Demeulemeester*

Werkleider: *Brecht Cardoen*

2008-2009

2. Probleemstelling en literatuuroverzicht

2.1. Probleemstelling

In deze sectie wordt een gedetailleerde beschrijving gegeven van het distributed scheduling probleem waarmee de onderneming geconfronteerd wordt. In het distributed scheduling probleem dat in deze meesterproef behandeld wordt, moeten orders optimaal toegewezen worden aan verschillende fabrieken en moet tegelijkertijd de optimale productieplanning voor elke fabriek bepaald worden. De hoofdzetel van de onderneming ontvangt dagelijks een veelvoud aan orders waarvoor enerzijds beslist moet worden in welke fabriek de orders geproduceerd moeten worden en anderzijds aan welke run in de fabriek de elementen van het order toegewezen moeten worden. Het doel bestaat erin de totale winst (opbrengst-kosten) te optimaliseren, waarbij de orders hun deadline halen en geen enkele run zijn capaciteit overschrijdt. De vloerelementen onderscheiden zich inzake de specificaties met betrekking tot de familie waartoe het vloerelement behoort, de dikte, wapeningscode en lengte. Overeenstemming voor wat betreft familie, dikte en wapeningscode is de voorwaarde om elementen te verzamelen per run. Afhankelijk van het betonvolume heeft elk element haar eigen capaciteitsbehoefte, een behoefte die op haar beurt ook beïnvloed kan worden door de fabriek waar het element geproduceerd wordt. De betrokken productie-entiteiten zijn qua locatie geografisch verspreid in de markt en hebben een van elkaar afwijkende lay-out. Deze laatste is bepalend voor de capaciteit van de productiebanen. Elementen van eenzelfde order worden na productie getransporteerd naar eenzelfde locatie. Dit brengt een transportkost met zich mee die afhankelijk zal zijn van de afstand werf-fabriek en door de verschillende locaties van de afnemers verschillend zal zijn voor alle orders. Verder wordt gesteld dat alle elementen van eenzelfde order in eenzelfde fabriek geproduceerd moeten worden.

2.2. Literatuuroverzicht

Promotor: Prof. Erik Demeulemeester

Werkleider: Brecht Cardoen

2008-2009

Chen en Pundoor (2006) hebben een probleem bestudeerd waarbij orders toegewezen worden aan fabrieken met een verschillende locatie, productiviteit en kostenstructuur. Deze fabrieken beschikken over slechts één productielijn waardoor het planningsprobleem van de orders in de fabriek neerkomt op het bepalen van de optimale volgorde van de orders. Eenmaal deze orders geproduceerd zijn, worden ze naar een distributiecentrum getransporteerd voor distributie. Vier prestatie maatstaven worden in deze paper geanalyseerd, waarbij zowel de productie- en distributiekost als de leveringstijd in acht genomen wordt. Deze analyse gebeurt op basis van efficiënte algoritmes en heuristieken die de auteurs geformuleerd hebben voor de verschillende gevallen van het probleem. Jia et al. (2002, 2003) hebben een genetisch algoritme voorgesteld om distributed scheduling problemen op te lossen. Ze hebben hun algoritme getest op voorbeelden en hieruit blijkt dat het algoritme zowel effectief als efficiënt is. De voorbeelden waarop het algoritme getest werd waren echter zeer klein vergeleken met het probleem dat in deze meesterproef besproken wordt.

Leung et al. (2003) hebben een probleem bestudeerd waarmee een lingerie-multinational geconfronteerd werd. Het probleem betreft de optimale toewijzing van verschillende producten aan fabrieken en het toewijzen van de producten aan verschillende types werknemers in elke fabriek. Een extra obstakel hierbij was het feit dat de doelfunctie opgebouwd was uit verschillende conflicterende objectieven. De auteurs hebben een goal programming model voorgesteld om dit probleem optimaal op te lossen. DiNatale en Stankovic (1995) hebben een schedulingmethode voorgesteld die gebaseerd is op simulated annealing om taken met deadlines, volgordebependingen en *exclusion constraints* toe te wijzen aan processoren en de toegewezen taken te schedulen op de cpu's. Eerst wordt de toewijzing van de taken aan de processoren als een gegeven genomen, later in de paper wordt aangetoond op welke manier de beschreven methode uitgebreid kan worden om ook het toewijzingsprobleem op te lossen. Chan et al. (2006a) hebben een genetisch algoritme met dominante genen voorgesteld om distributed scheduling problemen op te lossen. Dit algoritme werd specifiek ontworpen voor flexibele werkplaatsen (flexible manufacturing systems). Het voorgestelde algoritme werd vergeleken met andere algoritmes en getest op verschillende problemen teneinde de goede prestatie van het algoritme aan te tonen. De resultaten werden verder uitgebreid in Chan et al. (2006b) waarbij ook het onderhoud

Promotor: *Prof. Erik Demeulemeester*

Werkleider: *Brecht Cardoen*

2008-2009

van machines in acht genomen werd. De resultaten van Chan et al. (2006b) werden onder andere vergeleken met de resultaten bekomen in Chan et al. (2006a) waaruit blijkt dat het in beschouwing nemen van het machineonderhoud betere resultaten oplevert. In Chung et al. (2009) wordt vervolgens het algoritme dat in Chan et al. (2006b) voorgesteld werd aangepast. Deze aanpassing verbetert het lokale zoekvermogen van het originele algoritme door het iteratief oplossen van het toewijzingsprobleem en het productieplanningsprobleem met het onderhoudsprobleem, wat een beter resultaat tot gevolg heeft.

3. Dataverzameling

In de voorgaande sectie werden kort de verschillende jobs besproken die deel uitmaken van het productieproces. De precieze doorlooptijd van een job kan afhankelijk zijn van de specificiteit van de te produceren elementen. De verschillen in fabriekslay-out zorgen evenwel voor bijkomende afwijkingen in jobtijden. De factoren die daarin een rol spelen worden in hun algemeenheid wat verder in deze sectie besproken. Aansluitend wordt in detail de mate van de invloed per fabriek bepaald. In eerste instantie wordt echter binnen de behandeling van de problematiek enig houvast gecreëerd. Daartoe wordt een beroep gedaan op de mogelijkheden van een theoretisch model. Het theoretisch model zal gebruikt worden voor de berekening van de productietijden van de vloertypes in de verschillende fabrieken. Elementair voor het berekenen van deze productietijden is de notie omtrent het aantal banen waarop gelijktijdig geproduceerd wordt. Indien er vanuit gegaan wordt dat er geproduceerd wordt volgens het theoretisch model, zal het steeds mogelijk zijn het aantal banen waarop simultaan geproduceerd wordt te bepalen. Het is belangrijk hierbij op te merken dat indien de werkelijke productietijd (uithardingstijd) kleiner is dan de theoretische productietijd (uithardingstijd), veiligheidsbeperkingen het verhinderen vroeger te starten met de volgende activiteit. Er zal dus gewacht moeten worden tot de theoretische productietijd (uithardingstijd) verstreken is vooraleer er overgegaan kan worden tot de volgende activiteit op de baan. Zodoende zal het systeem van continue

Promotor: *Prof. Erik Demeulemeester*

Werkleider: *Brecht Cardoen*

2008-2009

productie behouden blijven². Anderzijds bestaat ook de mogelijkheid dat de werkelijke productietijd (uithardingstijd) groter is dan de theoretische productietijd (uithardingstijd). In dit geval zal, om dezelfde reden van veiligheid, de start van alle activiteiten op de andere banen in de hal waar het element geproduceerd (uitgehard) wordt uitgesteld worden met het verschil tussen de werkelijke productietijd (uithardingstijd) en de theoretische productietijd (uithardingstijd). Bijgevolg blijft het systeem van continue productie ook in dit geval behouden³.

² Zie Bijlage 2

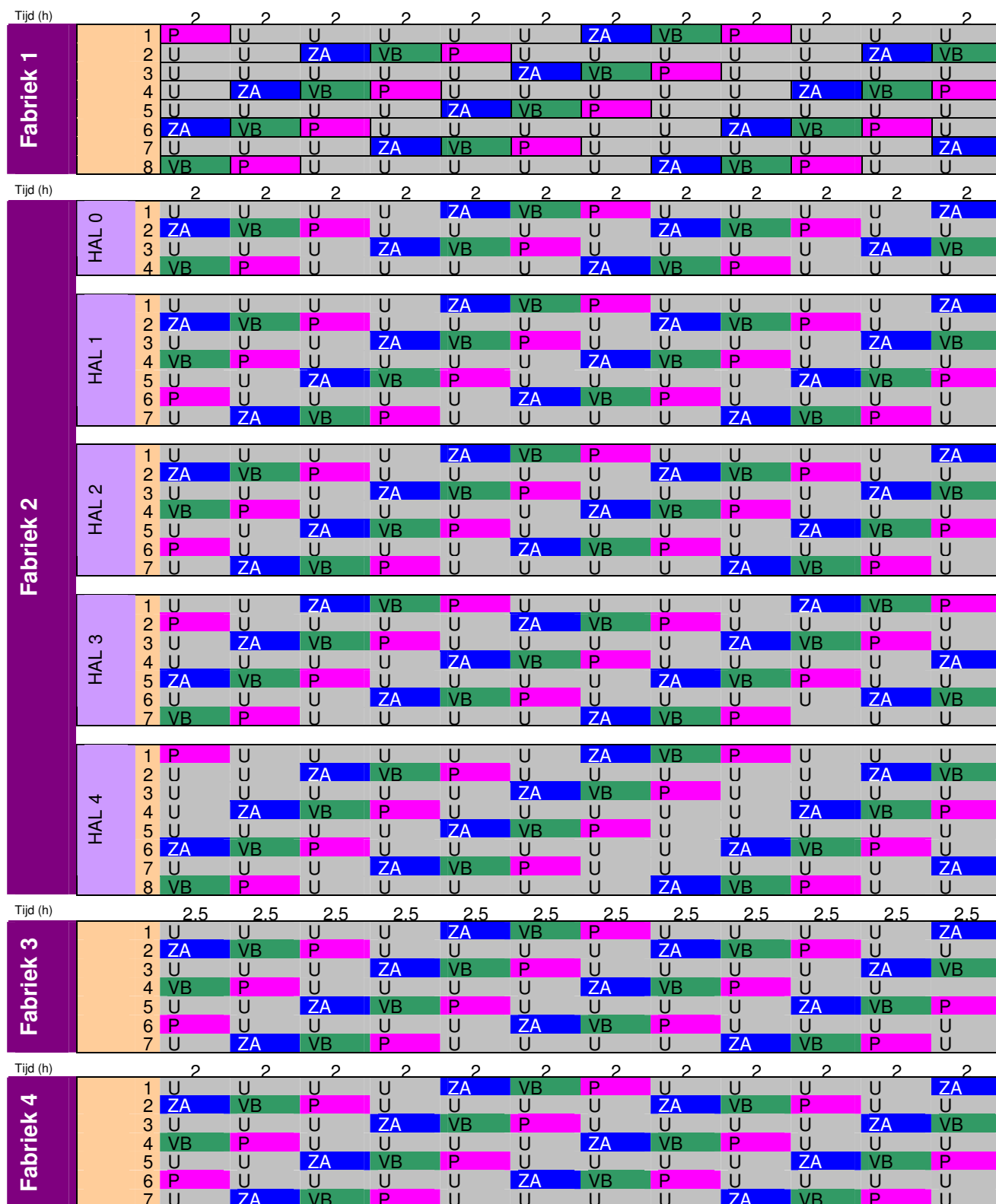
³ Zie Bijlage 3

Promotor: Prof. Erik Demeulemeester

Werkleider: Brecht Cardoen

2008-2009

3.1. Beschrijving van het theoretisch model



Figuur 2: Voorstelling van het theoretisch model⁴

VB: Voorbereiden

P: Produceren

U: Uitharden

ZA: Zagen

⁴ Let op, dit model geeft een patroon aan volgens welke geproduceerd moet worden, geen vast productieschema dat elke dag opnieuw uitgevoerd moet worden.

Promotor: Prof. Erik Demeulemeester

Werkleider: Brecht Cardoen

2008-2009

Figuur 2 geeft voor iedere fabriek een schematisch overzicht van de beschikbare productiebanen. Per baan wordt de opeenvolging van de verschillende productieactiviteiten weergegeven voor 24 uur. Concreet wordt aangegeven wanneer en hoe lang er volgens het theoretisch model voorbereid, geproduceerd, uitgehard, gezaagd en afgeruimd wordt op de verschillende banen. Aangezien er in werkelijkheid continu geproduceerd moet worden door de grote hoeveelheid aan orders, gaat het theoretische model uit van een continue productie in elke fabriek en hal.

Algemeen stelt het model dat, voor een netto-baanlengte van 120 meter, er 120 minuten voorbereiding nodig zijn, 120 minuten om te produceren en 120 minuten om te zagen/af te ruimen. Gezien de overeenstemming qua baanlengte geldt het voorgaande voor Fabriek 1, Fabriek 2 en Fabriek 4. Voor Fabriek 3, waar de lengte van de banen 150 meter belooft, bedragen de voorbereidings-, productie- en de zaag/afruimtijden 150 minuten.

De duurtijd van de uithardingsfase wordt bepaald door het systeem van continue productie met als enige beperking dat deze minstens acht uur moet bedragen. Dit leidt onmiddellijk tot de vaststelling dat hierdoor volledig continue productie onmogelijk zal zijn in hal 0 van Fabriek 2.

3.2. Validiteit van het theoretisch model

De lay-out van de verschillende fabrieken en de veiligheidsvoorschriften leggen zekere beperkingen op aan de productieplanning. De waarde van het theoretisch model is kritiek in de mate waarin met deze beperkingen rekening gehouden kan worden. Hier zal verder ingegaan worden op de aard en de invloed van de verschillende beperkende factoren.

3.2.1. Beperkingen met betrekking tot de aanvoer van beton

In elk van de vier fabrieken bestrijkt het proces van het aanvoeren van beton drie fases: het mengen van de grondstoffen tot beton door de menger, het transport van het betonmengsel door middel van rolbruggen en het gieten van het beton door de glijbekistingsmachine. Deze drie fases kunnen grotendeels simultaan gebeuren, maar moeten uiteraard op elkaar afgestemd zijn. Voor de berekening van de productietijden van de vloerelementen zullen dan ook naast de beperkingen van iedere fase afzonderlijk, de beperkingen die uit de interactie van de fases voortkomen meegenomen worden.

Promotor: Prof. Erik Demeulemeester

Werkleider: Brecht Cardoen

2008-2009

3.2.2. Beperkingen met betrekking tot het simultaan aanvoeren van beton en afruimen van afgewerkte welfsels

Bij productie volgens het theoretisch model wordt gelijktijdig geproduceerd en afgeruimd. Indien de kubelbrug en de afruimbrug op hetzelfde spoor rijden, kan dit leiden tot een probleemsituatie. Bij het afruimen van de vloerelementen is het van belang dat de kortere vloerelementen bovenop de langere vloerelementen gestapeld worden. Het gieten van het beton op de baan gebeurt gewoonlijk van ankerzijde naar spanzijde. Indien de langere elementen die afgeruimd moeten worden zich aan spanzijde bevinden, zal de kubelbrug hinder ondervinden van de afruimbrug.

3.2.3. Beperking met betrekking tot de afstand tussen de banen

In veel gevallen laat de afstand tussen twee naast elkaar liggende banen machines niet toe elkaar te passeren. Hierdoor zal een snellere machine op een bepaald moment verplicht worden het ritme van een tragere machine over te nemen, hetgeen uiteraard een verlies van efficiëntie met zich meebrengt.

3.2.4. Beperkingen met betrekking tot de hefcapaciteit van de afruimbruggen

De hefcapaciteit van de afruimbruggen is beperkt. Hierdoor zou het kunnen dat bepaalde platen niet geproduceerd kunnen worden in bepaalde fabrieken, aangezien ze daar niet afgeruimd kunnen worden.

3.3. Invloed van de beperkingen per fabriek

In de voorgaande subsectie werden kort de beperkingen geformuleerd en werd toegelicht waaraan het model moet voldoen teneinde valide te zijn. Hieronder zal enerzijds nagegaan worden of het theoretisch model overeind blijft als we de beperkingen concretiseren in de context van elke fabriek. Anderzijds zal aangegeven worden hoe de beperkingen de data beïnvloeden en wordt een grafische voorstelling gegeven van de berekende data voor elke fabriek.

3.3.1. Fabriek 1

Fabriek 1 is uitgerust met acht banen van 119 m lengte. De menginstallatie bevindt zich aan ankerzijde en de betonaanvoer naar de glijbekistingsmachine gebeurt via een kubelbrug. Door middel van een dubbeltakelbrug met een hefvermogen van 13 ton kunnen de vloerelementen afgeruimd worden en

Promotor: Prof. Erik Demeulemeester

Werkleider: Brecht Cardoen

2008-2009

worden de productiemachines gemanipuleerd. In Fabriek 1 wordt zijdelings afgeruimd op trucks. Deze trucks worden geplaatst in de middenzone die links en rechts geflankeerd wordt door vier productiebanen.

3.3.1.1. Beperkingen met betrekking tot de aanvoer van beton

In Sectie 3.2.1 werd gezegd dat, teneinde aan de beperkingen met betrekking tot de aanvoer van beton te voldoen, bij de berekening van de productieduurtijden rekening gehouden moet worden met alle beperkingen in elke fase van de aanvoer afzonderlijk, maar ook met de beperkingen die de interactie tussen deze verschillende fasen met zich meebrengt. Hiertoe worden de beperkingen besproken voor elke fase apart (mengen, transport, gieten van het beton) en ook wordt aangegeven hoe deze beperkingen de andere fasen beïnvloeden.

Mengen. De capaciteit van de menger bedraagt 0,85 m³. De mengtijd is gelijk aan 150 seconden. Er moet opgemerkt worden dat een nieuwe mengcyclus pas gestart wordt eenmaal de kubelbrug leeg is, dit om te vermijden dat het beton zou verharderen in de menger. Hiermee zal rekening gehouden moeten worden bij de berekening van het aanvoerritme van de kubelbrug.

Transport. Het transport van het beton van de menger naar de glijbekistingsmachine wordt verzorgd door de kubelbrug. De capaciteit van de kubelbrug bedraagt 1,7 m³. Deze is dus twee maal zo groot is als de capaciteit van de menger. De kubelbrug zal dan ook steeds twee mengingen ontvangen. Het aanvoerritme van de kubelbrug wordt bepaald door:

$$\text{Aanvoerritme kubelbrug} = \text{Max} \{ \text{retourtijd kubelbrug}^5, \text{aanvoerritme menger}^5 \} + 1 \text{ minuut}^6 + \text{mengtijd menger} + \text{heenrijtijd kubelbrug} \quad (7)$$

Teneinde de berekeningen eenvoudig te houden zal de variabiliteit van de rijtijden van de cyclusbrug slechts gedeeltelijk opgenomen worden in het model. Voor de berekening van het aanvoerritme wordt vertrokken van de retourtijd (= heenrijtijd) aan ankerzijde en deze is gelijk aan 139 seconden. Vanaf

⁵ Voor een verklaring van de term zie Bijlage 4

⁶ Storttijd menger

Promotor: Prof. Erik Demeulemeester

Werkleider: Brecht Cardoen

2008-2009

het moment dat de retourtijd gelijk is aan het aanvoerritme van de menger, zal zowel de retourtijd als de heenrijtijd van de kubelbrug gelijk gesteld worden aan 90 (= aanvoerritme menger). En wanneer (7) + 1 minuut gelijk is aan het vraagritme van de glijbekistingsmachine aan maximale snelheid zal de retourtijd (= heenrijtijd) een waarde aannemen die kleiner of gelijk is aan de waarde waarvoor (7) + 1 minuut gelijk is aan het vraagritme van de glijbekistingsmachine aan maximale snelheid.

Storten. Voor het gieten van het beton wordt gebruik gemaakt van een glijbekistingsmachine met maximale snelheid 1,5 m/min. Tijdens het storten van het beton in de glijbekistingsmachine rijden zowel de kubelbrug als de glijbekistingsmachine aan de snelheid van de glijbekistingsmachine. De kubelbrug rijdt dus mee met de glijbekistingsmachine tijdens het storten. Aangezien de snelheid van de glijbekistingsmachine veel kleiner is dan deze van de kubelbrug, kan gesteld worden dat de kubelbrug stilstaat tijdens het storten. Om de uiteindelijke productietijd van een element te berekenen wordt er dus gebruik gemaakt van volgend resultaat:

$$\text{Productietijd van het element} = \text{Max} \{ \text{aanvoerritme kubelbrug} + 1 \text{ minuut}^7, \text{vraagritme glijbekistingsmachine aan maximale snelheid} \} \quad (8)$$

Wanneer (7) nu gesubstitueerd wordt in (8), wordt volgend resultaat verkregen:

$$\text{Max} \{ \text{max} \{ \text{retourtijd kubelbrug, aanvoerritme menger} \} + 1 \text{ minuut} + \text{mengtijd menger} + \text{heenrijtijd kubelbrug} + 1 \text{ minuut, vraagritme glijbekistingsmachine aan maximale snelheid} \} \quad (9)$$

De snelheid van de glijbekistingsmachine wordt nu bepaald door:

$$\text{snelheid glijbekistingsmachine} = \frac{\text{kubelvolum}e (m^3) * \text{massadichth. van beton} (kg/m^3)}{\frac{\text{massa per } m^2 (kg/m^2) * \text{baanbreedte} (m)}{(9)(min)}} \quad (10)$$

De productietijd om een baan (120 m) te maken wordt nu berekend als volgt:

$$120m * (1/ \text{snelheid glijbekistingsmachine})$$

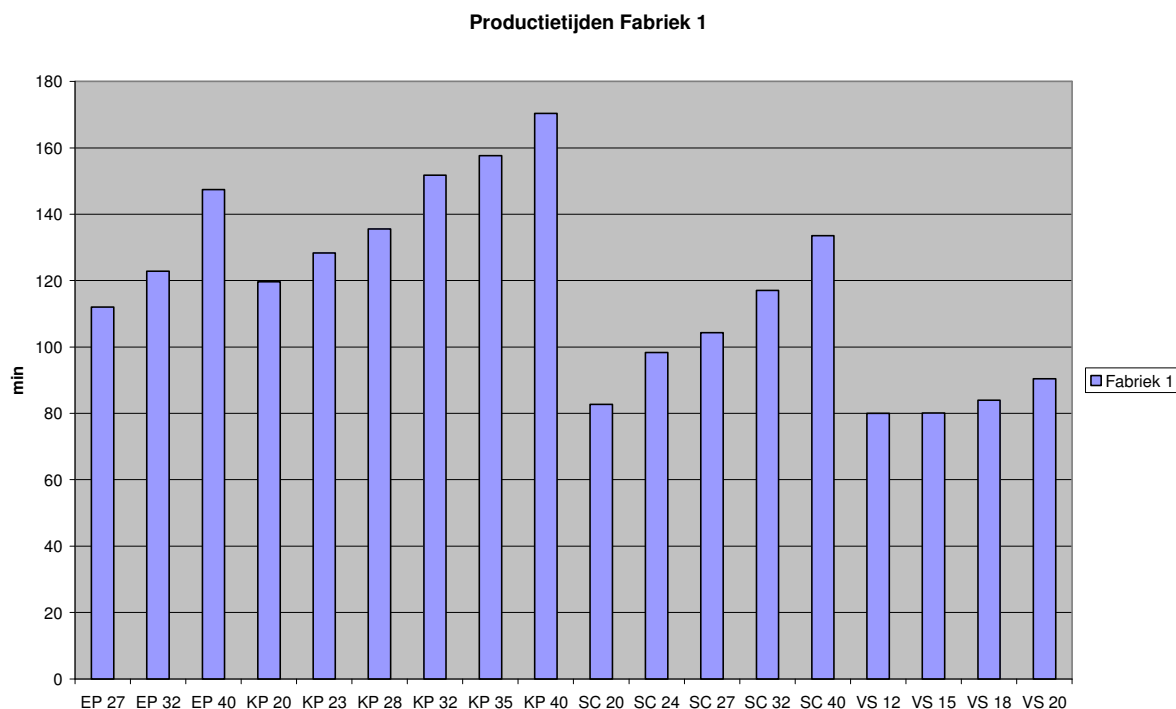
⁷ Storttijd kubelbrug

Promotor: Prof. Erik Demeulemeester

Werkleider: Brecht Cardoen

2008-2009

Op basis van bovenstaande theoretische uiteenzetting werden de productietijden voor Fabriek 1 berekend. In Figuur 3 worden deze resultaten grafisch weergegeven. In Bijlage 10* kunnen de exacte productietijden teruggevonden worden.



Figuur 3: Productietijden Fabriek 1

3.3.1.2. Beperkingen met betrekking tot het simultaan aanvoeren van beton en afruimen van afgewerkte welfsels

In Fabriek 1 wordt zijdelings afgeruimd. Hierbij staan er meerdere opleggers in de tussengang. Dit maakt het mogelijk om eerst de kortere vloerelementen aan ankerzijde af te ruimen en later de langere aan spanzijde. Op deze manier wordt de kubelbrug niet gehinderd.

3.3.1.3. Beperking met betrekking tot de afstand tussen de banen

Deze beperking houdt in dat machines elkaar niet kunnen kruisen, noch kunnen inhalen op naastliggende banen. Het theoretisch model werd zo opgesteld dat machine-activiteiten nooit simultaan op aanliggende banen plaatsvinden in Fabriek 1.

Promotor: Prof. Erik Demeulemeester

Werkleider: Brecht Cardoen

2008-2009

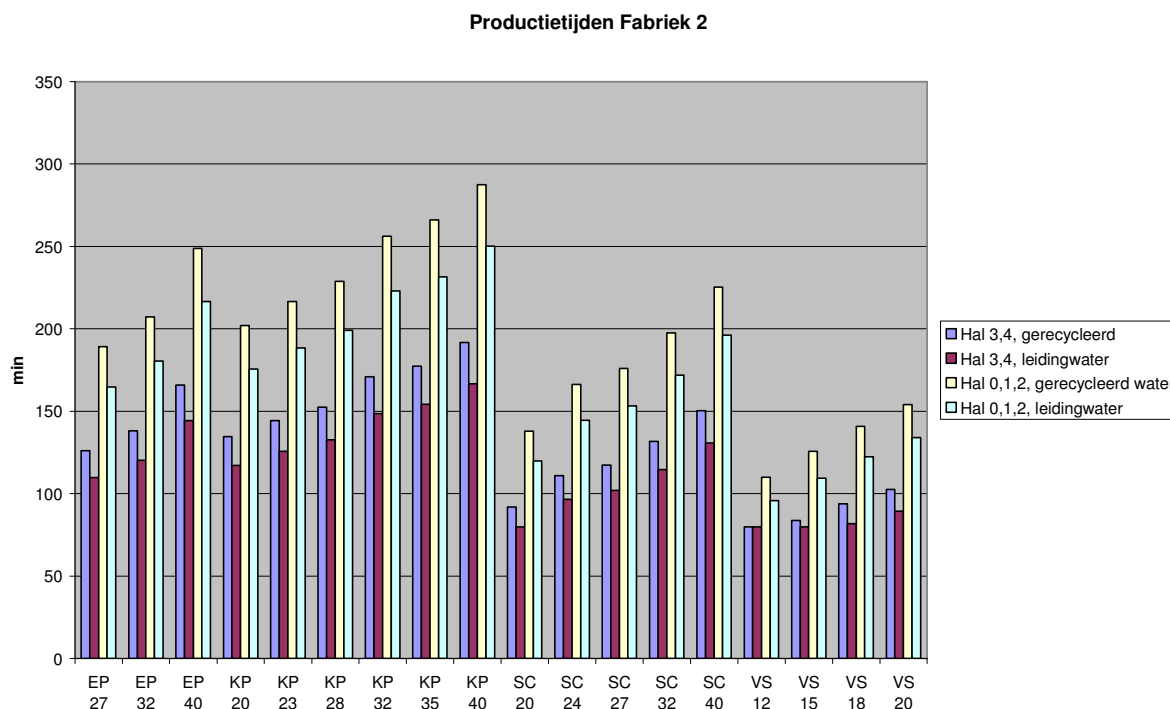
3.3.1.4. Beperkingen met betrekking tot de hefcapaciteit van de afzuimbruggen

Aangezien de hefcapaciteit van de afzuimbrug in Fabriek 1 13 ton bedraagt, zal elk type vloerelement afgeruimd kunnen worden.

3.3.2. Fabriek 2

3.3.2.1. Beperkingen m.b.t. de aanvoer van beton

Net zoals voor Fabriek 1 werden ook voor Fabriek 2 de beperkingen die de verschillende productiefasen met zich meebrengen besproken en werd gekeken naar welke invloed deze hebben op de productietijd van de vloerelementen. Hieronder worden de berekende productietijden grafisch weergegeven waarbij een onderscheid gemaakt wordt tussen de productietijd die bekomen wordt als er gewerkt wordt met leidingwater en de productietijd die bekomen wordt als er gerecycleerd water gebruikt wordt. In de Sectie 5 zal nagegaan worden welke invloed de oorsprong van het toegevoegde water heeft op de totale doorlooptijd. De theoretische uiteenzetting waarop deze resultaten gebaseerd zijn, is terug te vinden in Bijlage 5.



Figuur 4: Productietijden Fabriek 2

Promotor: Prof. Erik Demeulemeester

Werkleider: Brecht Cardoen

2008-2009

3.3.2.2. Beperkingen met betrekking tot het simultaan aanvoeren van beton en afruimen van afgewerkte vloerelementen

In Fabriek 2 wordt er afgeruimd op trucks. Deze trucks kunnen boven een geproduceerde baan rijden. Op die manier kunnen de kortere vloerelementen aan ankerzijde eerst afgeruimd worden, en later de langere elementen aan spanzijde. Zo wordt de kubelbrug niet gehinderd.

3.3.2.3. Beperking met betrekking tot de afstand tussen de banen

Deze beperking houdt in dat machines elkaar niet kunnen kruisen, noch kunnen inhalen op naastliggende banen. Het theoretisch model werd zo opgesteld dat machine-activiteiten nooit simultaan op aanliggende banen kunnen plaatsvinden in Fabriek 2.

3.3.2.4. Beperkingen met betrekking tot de hefcapaciteit van de afruimbruggen

De hefcapaciteit van de afruimbrug in hallen 0, 1 en 2 bedraagt slechts 6 ton. Hierdoor kunnen in deze hallen enkel de types EP 27, EP 32, EP 40, KP 23, KP 28, KP 32, KP 35, KP 40, SC 24, SC 27, SC 32 en SC 40 afgeruimd worden. Met deze beperking zal bijgevolg rekening gehouden moeten worden bij het toewijzingsprobleem. Voor de hallen 3 en 4 is de hefcapaciteit van de afruimbrug 16 ton. In deze hallen kunnen dus alle types afgeruimd worden.

3.3.3. Fabriek 3

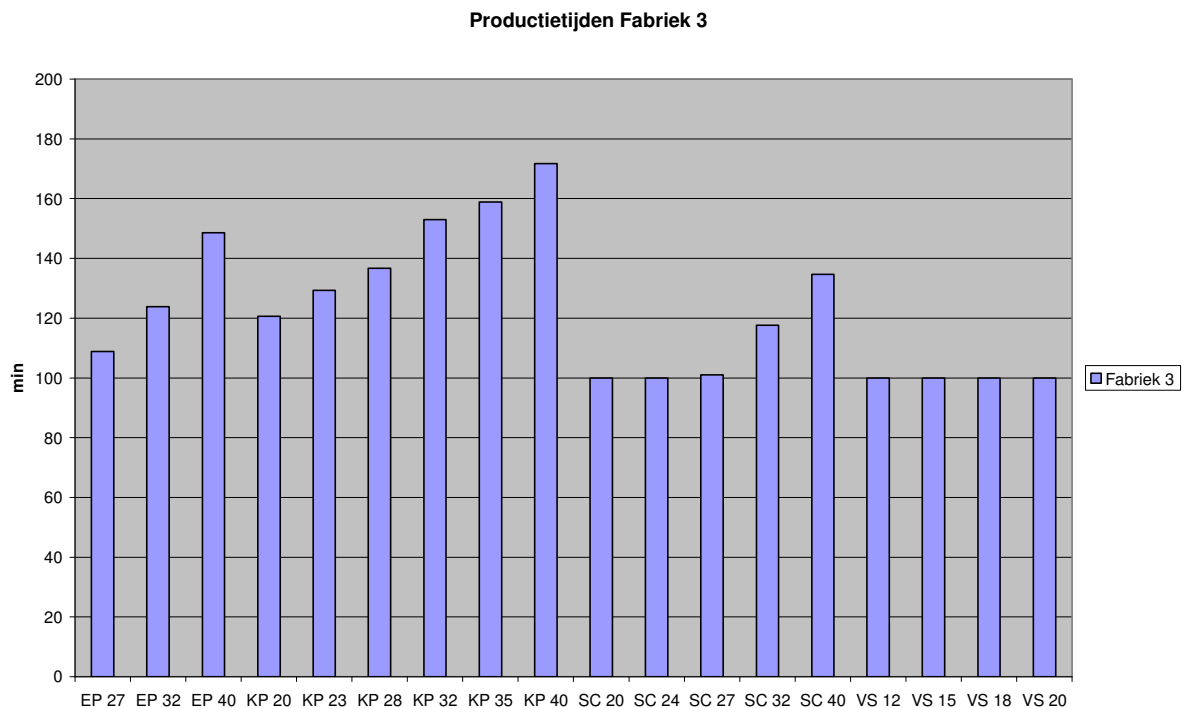
3.3.3.1. Beperkingen met betrekking tot de aanvoer van beton

Ook voor Fabriek 3 werden voor elke fase apart de beperkingen besproken en werd gekeken hoe deze beperkingen opleggen aan de andere fasen en welke invloed ze hebben op de productietijd van de vloerelementen. De theorie voor Fabriek 3 kan teruggevonden worden in Bijlage 8. De grafische resultaten worden in Figuur 5 weergegeven, terwijl de cijfermatige resultaten terug te vinden zijn in Bijlage 13*.

Promotor: Prof. Erik Demeulemeester

Werkleider: Brecht Cardoen

2008-2009



Figuur 5: Productietijden Fabriek 3

3.3.3.2. Beperkingen met betrekking tot het simultaan aanvoeren van beton en afruimen van afgewerkte welfsels

In Fabriek 3 wordt zijdelings afgeruimd. Hierbij staan er meerdere opleggers in de tussengang. Dit maakt het mogelijk om eerst de kortere vloerelementen aan ankerzijde af te ruimen en later de langere aan spanzijde. Op deze manier wordt de kubelbrug niet gehinderd.

3.3.3.3. Beperking met betrekking tot de afstand tussen de banen

Deze beperking houdt in dat machines elkaar niet kunnen kruisen, noch kunnen inhalen op naastliggende banen. Het theoretisch model werd zo opgesteld dat machine-activiteiten nooit simultaan plaatsvinden op aanliggende banen in Fabriek 3.

Promotor: Prof. Erik Demeulemeester

Werkleider: Brecht Cardoen

2008-2009

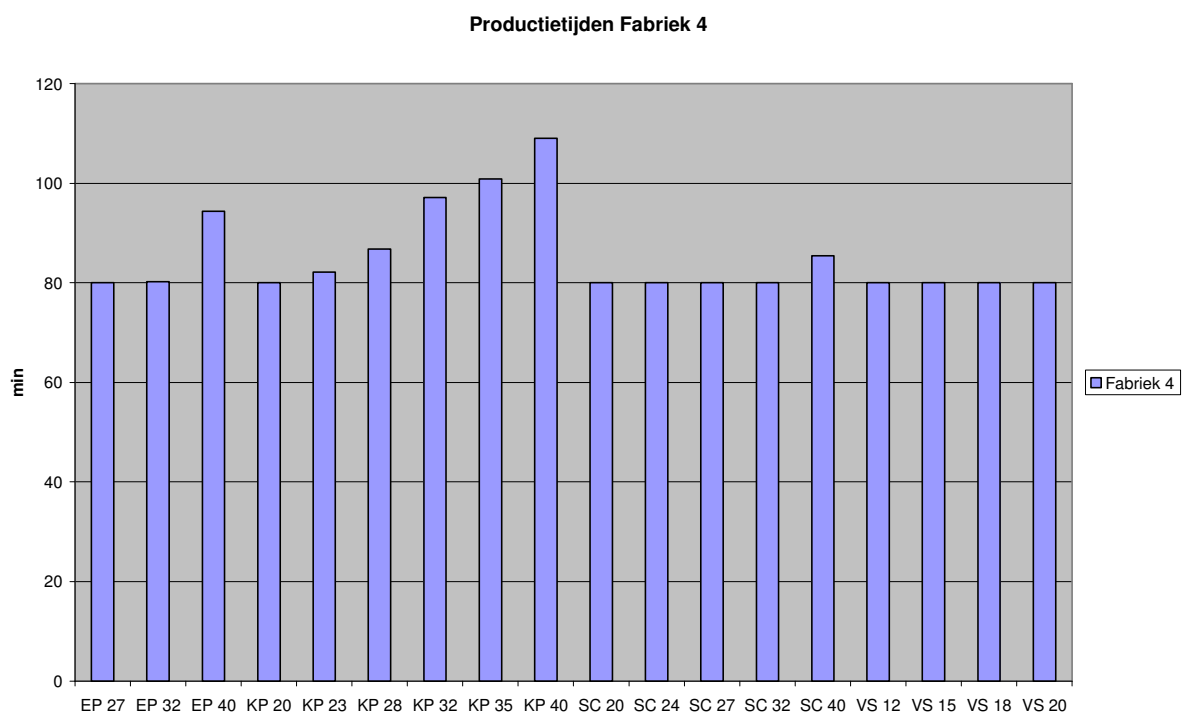
3.3.3.4. Beperkingen met betrekking tot de hefcapaciteit van de afruimbruggen

De afruimbrug in Fabriek 3 heeft een afruimcapaciteit van 16 ton. Bijgevolg kunnen alle verschillende types van vloerelementen afgeruimd worden.

3.3.4. Fabriek 4

3.3.4.1. Beperkingen met betrekking tot de aanvoer van beton

Op basis van de theoretische afleiding in Bijlage 9 werden de productietijden voor Fabriek 4 berekend. De productietijden worden grafisch weergegeven in Figuur 6 en zijn ook in cijfermatige vorm terug te vinden in Bijlage 15*.



Figuur 6: Productietijden Fabriek 4

3.3.4.2. Beperkingen met betrekking tot het simultaan aanvoeren van beton en afruimen van afgewerkte welfsels

In Fabriek 4 rijden de kubelbrug en de afruimbrug op een ander spoor en kunnen ze bijgevolg elkaar niet hinderen.

Promotor: Prof. Erik Demeulemeester

Werkleider: Brecht Cardoen

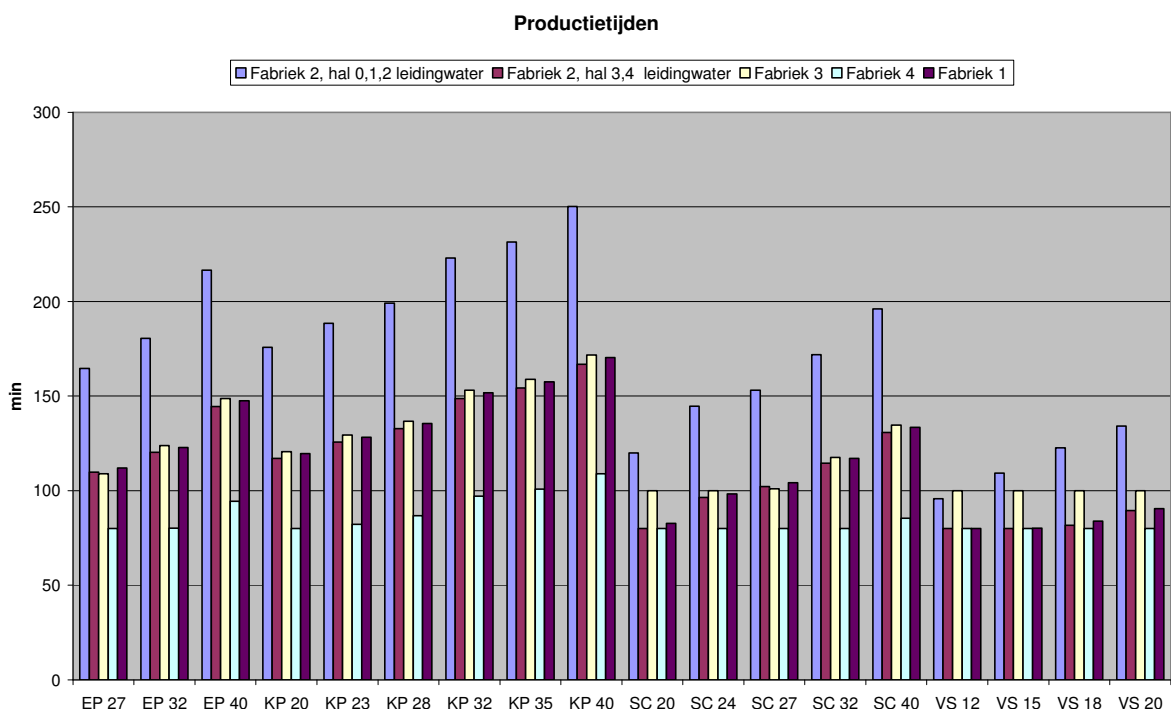
2008-2009

3.3.4.3. Beperking met betrekking tot de afstand tussen de banen

Deze beperking houdt in dat machines elkaar niet kunnen kruisen, noch kunnen inhalen op naastliggende banen. Het theoretisch model werd zo opgesteld dat machine-activiteiten nooit simultaan plaatsvinden op aanliggende banen in Fabriek 4.

3.3.4.4. Beperkingen met betrekking tot de hefcapaciteit van de afruimbruggen

Aangezien de hefcapaciteit van de afruimbrug in Fabriek 4 20 ton bedraagt, kan ieder type vloerelement afgeruimd worden. In Figuur 7 wordt een samenvattend overzicht gegeven van de berekende productietijden voor de verschillende fabrieken en de verschillende types. Het belang van deze verschillen in productietijd op de objectieffunctie zal onderzocht worden in Sectie 5.



Figuur 7: Overzicht productietijden van alle fabrieken

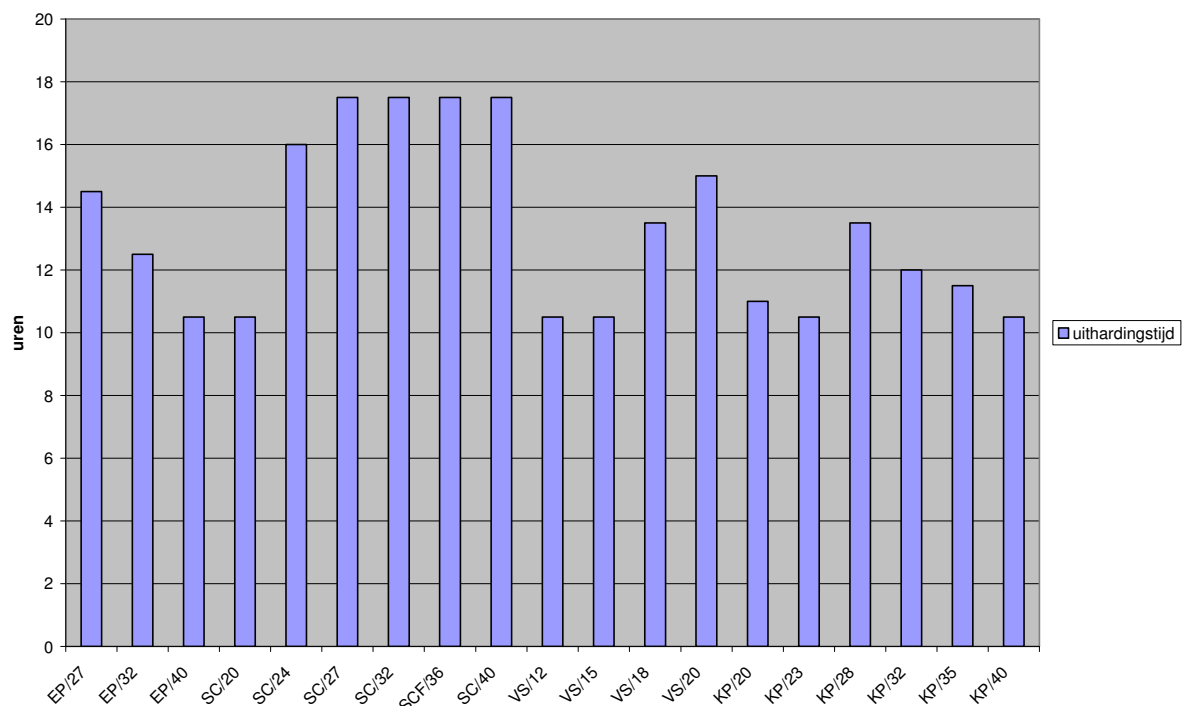
Promotor: Prof. Erik Demeulemeester

Werkleider: Brecht Cardoen

2008-2009

3.4. Uithardingstijden

De uithardingstijden verschillen naargelang de familie, dikte en wapeningscode van het vloerelement, maar zijn gelijk voor de verschillende fabrieken. In Figuur 8 worden de uithardingstijden voor elke familie en dikte weergegeven met de wapeningscode waarvoor het vloerelement de langste uithardingstijd heeft.



Figuur 8: Uithardingstijden voor de verschillende families en diktes

Door toevoeging van additieven aan de betonmengelingen is het mogelijk de uithardingstijd van de elementen met twee uur te verminderen. In Sectie 5 zal nagegaan worden hoe het gebruik van additieven de resultaten zal beïnvloeden.

Promotor: Prof. Erik Demeulemeester

Werkleider: Brecht Cardoen

2008-2009

4. Modelformulering

Volgende notatie wordt gebruikt:

Indices :

$i = \text{element}, i \in \{1, \dots, I\}$

$r = \text{run}, r \in \{1, \dots, R\}$

$h = \text{hal}, h \in \{1, \dots, H\}$

$t = \text{type element}, t \in \{1, \dots, T\}$

$o = \text{order}, o \in \{1, \dots, O\}$

$f = \text{fabriek}, f \in \{1, \dots, F\}$

$p = \text{productiestap}, p \in \{1, \dots, P\}$

Beslissingsvariabelen :

$$x_{irh} = \begin{cases} 1 & \text{als element } i \text{ is toegewezen aan run } r \text{ in hal } h \\ 0 & \text{anders} \end{cases}$$

$$y_{trh} = \begin{cases} 1 & \text{als run } r \text{ in hal } h \text{ van type } t \text{ is} \\ 0 & \text{anders} \end{cases}$$

$$z_{of} = \begin{cases} 1 & \text{als order } o \text{ geproduceerd wordt in fabriek } f \\ 0 & \text{anders} \end{cases}$$

$$w_{rh} = \begin{cases} 1 & \text{als run } r \text{ in hal } h \text{ wordt uitgevoerd} \\ 0 & \text{anders} \end{cases}$$

Hulpvariabelen :

$\text{lengtebaan}_{rh} =$ totale lengte van alle elementen die toegewezen zijn aan run r in hal h

$\text{start}_{rph} =$ start van de p^{de} productiestap van run r in hal h

$\text{uithardingstijd}_{rh} =$ uithardingstijd van run r in hal h

$\text{productietijd}_{rh} =$ productietijd van run r in hal h

$\text{vierkantemeter}_{th} =$ aantal m^2 van type t dat in hal h geproduceerd wordt

Parameters :

Promotor: Prof. Erik Demeulemeester

Werkleider: Brecht Cardoen

2008-2009

$productietijd_{th}$ =	productietijd per meter voor type t in hal h
$lengteproductiebaan_h$ =	lengte van de productiebaan in hal h
$aantalelementen_o$ =	aantal elementen in order o
$type_i$ =	type van element i
$fabriek_h$ =	fabriek waartoe hal h behoort
$deadline_o$ =	de deadline van order o
$margin_{th}$ =	marge van type t in hal h
$transportkost_{of}$ =	transportkost van order o geproduceerd in fabriek f
M =	groot getal
$uithardingstijd_t$ =	uithardingstijd van type t
$lengte_i$ =	lengte van element i
$aantal_h$ =	aantal blokjes uithardingstijd in hal h
$voorbereidingstijd_h$ =	voorbereidingstijd in hal h
$afruimtijd_h$ =	zaag- en afruimtijd in hal h
$order_i$ =	het order waartoe element i behoort
$vierkantemeterelem_i$ =	oppervlakte van element i
$horizon$ =	laatste beschikbare run

Het probleem kan nu geformuleerd worden als volgt:

$$\text{Max} \sum_t \sum_h margin_{th} * vierkantemeter_{th} - \sum_o \sum_f transportkost_{of} * z_{of} \quad (1)$$

$$\sum_r \sum_{i: type_i=t} vierkantemeterelem_i * x_{irh} - vierkantemeter_{th} = 0 \quad \forall h, \forall t \quad (2)$$

$$\sum_t y_{trh} \leq 1 \quad \forall r, h \quad (3)$$

Promotor: Prof. Erik Demeulemeester

Werkleider: Brecht Cardoen

2008-2009

$$x_{irh} - y_{irh} \leq 0 \quad \forall h, r, t, i : type_i = t \quad (4)$$

$$\sum_f z_{of} = 1 \quad \forall o \quad (5)$$

$$\left(\sum_{i:order_i=o} \sum_r \sum_{h:fabriek_h=f} x_{irh} \right) - aantalelementen_o * z_{of} = 0 \quad \forall f, \forall o \quad (6)$$

$$lengtebaan_{rh} - \sum_i lengte_i * x_{irh} = 0 \quad \forall r, \forall h \quad (7)$$

$$lengtebaan_{rh} \leq lengteproductiebaan_h \quad \forall r, \forall h \quad (8)$$

$$uithardingstijd_{rh} - \sum_t uithardingstijd_t * y_{irh} = 0 \quad \forall h, \forall r \quad (9)$$

$$uithardingstijd_{rh} - M * \sum_i x_{irh} \leq 0 \quad \forall h, \forall r \quad (10)$$

$$lengtebaan_{rh} * productietijd_{th} - productietijd_{baan_{rh}} = 0 \quad \forall h, \forall r, \forall t \quad (11)$$

$$productietijd_{baan_{rh}} - M * \sum_i x_{irh} \leq 0 \quad \forall h, \forall r \quad (12)$$

$$\begin{aligned} start_{8,1,h} &= start_{7,2,h} = start_{6,3,h} = start_{5,4,h} = \\ start_{4,5,h} &= start_{3,6,h} = start_{2,7,h} = 0 \end{aligned} \quad \forall h \quad (13)$$

$$start_{1,8,h} = 0 \quad \forall h = 1,4 \quad (14)$$

$$start_{r,1,h} - start_{r-1,1,h} - voorbereidingstijd_h \geq 0 \quad \forall r > 8, \forall h \quad (15)$$

$$start_{r,2,h} - start_{r-1,2,h} - afruimtijd_h \geq 0 \quad \forall r > 7, \forall h \quad (16)$$

$$start_{r,3,h} - start_{r-1,3,h} - productietijd_{baan_{rh}} \geq 0 \quad \forall r > 6, \forall h \quad (17)$$

Promotor: Prof. Erik Demeulemeester

Werkleider: Brecht Cardoen

2008-2009

$$start_{r,4,h} - start_{r-1,4,h} - \frac{uithardingstijdbaan_{rh}}{aantal_h} \geq 0 \quad \forall r > 5, \forall h \quad (18)$$

$$start_{r,5,h} - start_{r-1,5,h} - \frac{uithardingstijdbaan_{rh}}{aantal_h} \geq 0 \quad \forall r > 4, \forall h \quad (19)$$

$$start_{r,6,h} - start_{r-1,6,h} - \frac{uithardingstijdbaan_{rh}}{aantal_h} \geq 0 \quad \forall r > 3, \forall h \quad (20)$$

$$start_{r,7,h} - start_{r-1,7,h} - \frac{uithardingstijdbaan_{rh}}{aantal_h} \geq 0 \quad \forall r > 2, \forall h \quad (21)$$

$$start_{r,8,h} - start_{r-1,8,h} - \frac{uithardingstijdbaan_{rh}}{aantal_h} \geq 0 \quad \forall r > 1 \quad \forall h = 1,4 \quad (22)$$

$$start_{r,1,h} = start_{r-1,2,h} \quad \forall r > 8, \forall h \quad (23)$$

$$start_{r,2,h} = start_{r-1,3,h} \quad \forall r > 7, \forall h \quad (24)$$

$$start_{r,3,h} = start_{r-1,4,h} \quad \forall r > 6, \forall h \quad (25)$$

$$start_{r,4,h} = start_{r-1,5,h} \quad \forall r > 5, \forall h \quad (26)$$

$$start_{r,5,h} = start_{r-1,6,h} \quad \forall r > 4, \forall h \quad (27)$$

$$start_{r,6,h} = start_{r-1,7,h} \quad \forall r > 3, \forall h \quad (28)$$

$$start_{r,7,h} = start_{r-1,8,h} \quad \forall r > 2, \forall h = 1,4 \quad (29)$$

$$start_{rh7} + \frac{uithardingstijdbaan_{rh}}{aantal_h} - (1 - x_{irh}) * M \leq deadline_o$$

$$\forall h, \forall o \forall r, \forall i : order_i = o \quad (30)$$

Promotor: Prof. Erik Demeulemeester

Werkleider: Brecht Cardoen

2008-2009

$$start_{rh8} + \frac{withardingsstijdbaan_{rh}}{aantal_h} - (1 - x_{irh}) * M \leq deadline_o$$

$$\forall o \forall r, \forall i : order_i = o, \forall h = 1,4 \quad (31)$$

$$x_{irh} - w_{rh} \leq 0 \quad \forall r, \forall h, \forall i \quad (32)$$

$$w_{7*n,h} = w_{(7*n)-1,h} = w_{(7*n)-2,h} = 0 \quad n \in N_0 : R-7 < n*7 \leq R, \forall h = 4 \quad (33)$$

$$w_{rh} = 0 \quad \forall r < 8 \ \& \ \forall r > horizon, \forall h \quad (34)$$

$$\sum_r \sum_h x_{irh} = 1 \quad \forall i \quad (35)$$

$$x_{irh} \in \{0,1\} \quad \forall r, \forall h, \forall i \quad (36)$$

$$y_{irh} \in \{0,1\} \quad \forall h, \forall r, \forall t \quad (37)$$

$$z_{of} \in \{0,1\} \quad \forall f, \forall o \quad (38)$$

$$w_{rh} \in \{0,1\} \quad \forall h, \forall r \quad (39)$$

In de doelfunctie (1) wordt de winst geoptimaliseerd door de maximalisatie van de marge (verkoopprijs-productiekost) verminderd met de transportkost per order. Beperking (2) geeft aan hoeveel vierkante meter van type t geproduceerd wordt in hal h . Beperking (3) stelt dat alle elementen die gemaakt worden in een bepaalde run in een bepaalde hal van eenzelfde type moeten zijn (eenzelfde type houdt in dat zowel de familie en dikte als de wapeningscode gelijk zijn). Beperking (4) garandeert dat als er een element van type t in een bepaalde run in een bepaalde hal geproduceerd wordt de overeenkomstige y -variabele gelijk is aan 1. Beperking (5) stelt dat een order in één fabriek geproduceerd moet worden en beperking (6) bepaalt dat alle elementen van eenzelfde order in

Promotor: Prof. Erik Demeulemeester

Werkleider: Brecht Cardoen

2008-2009

dezelfde fabriek geproduceerd moeten worden. In beperking (7) wordt de som van de lengte van de te produceren vloerelementen in een bepaalde run berekend en in beperking (8) wordt ervoor gezorgd dat deze som de lengte van de productiebaan niet kan overschrijden. Beperking (9) bepaalt de uithardingstijd voor run r in hal h . Beperking (10) stelt dat de uithardingstijd van run r in hal h gelijk moet zijn aan nul indien er geen element geproduceerd wordt in run r in hal h . Beperking (11) bepaalt de productietijd van run r in hal h en beperking (12) garandeert dat de productietijd van run r in hal h gelijk is aan nul indien er geen element geproduceerd wordt in run r in hal h . Beperkingen (13) en (14) geven aan dat de start van productiestap 1 van run 8, productiestap 2 van run 7, productiestap 3 van run 6, productiestap 4 van run 5, productiestap 5 van run 4, productiestap 6 van run 3, productiestap 7 van run 2 en productiestap 8 van run 1 gelijk moet zijn aan nul. Beperkingen (15)-(22) zorgen ervoor dat de volgende productiestap van een run pas gestart wordt eenmaal de vorige productiestap beëindigd is. Beperkingen (23)-(29) garanderen dat productiestappen die uitgevoerd worden op naastliggende productiebanen gelijktijdig starten. Beperkingen (30) en (31) stellen dat alle elementen van een order geproduceerd moeten worden voor de deadline van dat order. Beperking (32) geeft aan dat als er een element gedurende run r in hal h geproduceerd wordt, de overeenkomstige w -variabele gelijk moet zijn aan één. Beperking (33) geeft aan dat bepaalde runs in hal 4 onbestaande zijn. Beperking (34) zorgt ervoor dat er niets kan geproduceerd worden tijdens de eerste 7 runs en na de laatste beschikbare run. Beperking (35) stelt dat een element in één run in één hal geproduceerd moet worden. Beperkingen (36)-(39) garanderen dat de respectievelijke x -, y -, z - en w -variabelen slechts de waarden nul of één kunnen aannemen.

Bovenstaand model zal als basismodel gebruikt worden. Vanuit dit basismodel zullen verschillende modellen afgeleid worden die een uitbreiding of aanpassing zijn van het basismodel.

In model 2 zal het basismodel uitgebreid worden met volgende beperking:

Promotor: Prof. Erik Demeulemeester

Werkleider: Brecht Cardoen

2008-2009

$$\sum_r y_{trh} = 0 \quad \forall h = 2,3,4, \forall t = 25 - 48 \text{ \& } 53 - 72$$

Deze beperking geeft aan dat in hallen 0, 1 en 2 van Fabriek 2 de types EP 27, EP 32, EP 40, KP 23, KP 28, KP 32, KP 35, KP 40, SC 24, SC 27, SC 32 en SC 40 niet afgeruimd kunnen worden ten gevolge van de beperkte hefcapaciteit van de takelbrug, zoals aangegeven in Sectie 3.3.2.4.

In model 3 wordt de objectieffunctie van het basismodel vervangen door onderstaande objectieffunctie:

$$\text{Min} \sum_o \sum_f \text{transportkost}_{of} * z_{of}$$

Op basis van een vergelijking van het resultaat van model 3 en het resultaat van het basismodel kan nagegaan worden of de afstand eventueel een goede heuristiek zou kunnen zijn voor het probleem.

In model 4 wordt ervan uitgegaan dat –in tegenstelling tot in het basismodel- de deadlines moeilijk haalbaar zijn. Dit zou kunnen voorkomen indien een groot project toegekend wordt of door een seizoensafhankelijkheid in de vraag. In dit model worden de harde beperkingen (30) en (31) van het basismodel omgevormd tot zachte beperkingen. Hiervoor wordt een nieuwe variabele ‘finishorder_o’ ingevoerd die voor elk order aangeeft wanneer dit ten vroegste klaar kan zijn. Hieronder wordt de aanpassing weergegeven:

$$\text{Min} \sum_o \text{finishorder}_o$$

$$\text{start}_{rh7} + \frac{\text{withardingstijdbaan}_{rh}}{\text{aantal}_h} - (1 - x_{trh}) * M - \text{finishorder}_o \leq 0$$

$$\forall h, \forall o \forall r, \forall i : \text{order}_i = o$$

$$\text{start}_{rh8} + \frac{\text{withardingstijdbaan}_{rh}}{\text{aantal}_h} - (1 - x_{trh}) * M - \text{finishorder}_o \leq 0$$

$$\forall o \forall r, \forall i : \text{order}_i = o, \forall h = 1,4$$

Promotor: Prof. Erik Demeulemeester

Werkleider: Brecht Cardoen

2008-2009

In bovenstaand model werd er geen rekening gehouden met de individuele deadlines van de orders (er wordt van uitgegaan dat het halen van eender welke deadline problematisch is). Indien een snelle productie voor sommige orders belangrijker is dan voor andere, kan dit in het model worden ingevoegd door gewichten te bepalen per order en deze in de doelfunctie te vermenigvuldigen met de variabele *finishorder*.

5. Resultaten

Teneinde de bovenstaande modellen op te lossen werd gebruikt gemaakt van ILOG OPL Studio 3.1. Dit programma werd uitgevoerd op een Dell Optiplex Intel pentium 4 met een processorsnelheid van 2 GHz en 768 MB RAM-geheugen.

Alvorens de resultaten te bespreken wordt eerst een motivatie gegeven voor de gekozen grootte van de instantie. Aangezien de vier fabrieken samen gemiddeld 500 elementen per dag produceren, werd initieel gekozen voor een dataset van 1000 elementen. Helaas bleek dat het geheugen van de gebruikte computer slechts toereikend was om ongeveer 300 elementen te verwerken. Om de verschillende modellen op een efficiënte manier op te lossen werd na enige tijd duidelijk dat een honderdtal elementen het maximaal aantal was dat verwerkt kan worden op de gebruikte computer. Om de resultaten van de verschillende modellen vergelijkbaar te houden werd er bijgevolg voor geopteerd om met een instantie te werken van 108 elementen. Voor bepaalde modellen zal wel aangegeven worden welke de bekomen resultaten zijn voor een grotere dataset. De gebruikte data werden gegenereerd met behulp van een programma dat orders genereert op basis van criteria die afgeleid werden uit de werkelijke data.

Voor een instantie met 108 elementen, 14 beschikbare runs en een gezamenlijke deadline van 3000 minuten wordt een optimale oplossing (3672 euro) bekomen in 149 seconden. Indien deze zelfde instantie gebruikt wordt voor model 2, wordt dezelfde optimale oplossing bekomen, maar de rekentijd wordt meer dan verdubbeld (324 seconden).

Promotor: Prof. Erik Demeulemeester

Werkleider: Brecht Cardoen

2008-2009

De elementen worden in beide modellen in Fabriek 1 en in Fabriek 4 geproduceerd. Dit zou erop kunnen wijzen dat elementen van type EP 27, EP 32, EP 40, KP 23, KP 28, KP 32, KP 35, KP 40, SC 24, SC 27, SC 32 en SC 40 sowieso niet in hallen 0, 1 en 2 van Fabriek 2 geproduceerd worden. Andere instanties waarbij de data zo wordt aangepast dat het model elementen moet produceren in hallen 0, 1 of 2 van Fabriek 2 bevestigen dit vermoeden aangezien het resultaat van model 1 niet verschilt van het resultaat van model 2 voor deze instanties.

De verdubbeling van de rekestijd van model 2 is niet wat logischerwijs verwacht wordt als de oplossingsruimte verkleind wordt door de toevoeging van een beperking. Echter, empirisch werd vastgesteld dat in bepaalde gevallen waarbij men logischerwijs aanneemt dat de runtijd zal afnemen (een inkrimping van de dataset of een verkleining van het oplossingsgebied door de toevoeging van een beperking) de runtijd groter was (en omgekeerd). Een verklaring hiervoor zou kunnen zijn dat het programma een andere weg aflegt tijdens zijn zoektocht naar de optimale oplossing en op die manier de upperbound minder snel tegenkomt. Hieruit kan dus besloten worden dat er geen algemene uitspraken gedaan kunnen worden betreffende de toe- of afname van de runtijd bij een verandering van het model of een aanpassing van de data. Ook kan besloten worden dat hoewel resultaten intuïtief niet logisch lijken (zoals in bovenstaand geval) deze niet noodzakelijk foutief zijn. Ten slotte blijkt hieruit dat een grondige kennis van de gebruikte oplossingsmethode zeer belangrijk is, aangezien enkel op die manier uitsluitel gegeven kan worden over bovenstaand geval⁸ en aangezien dit wél toelaat patronen te identificeren.

Indien de oplossing die bekomen wordt bij de uitvoering van model 3 in de objectieffunctie van model 1 gesubstitueerd wordt, wordt een resultaat bekomen dat slechts 2% afwijkt van het bekomen resultaat van model 1. Voor een instantie met 211 elementen vermindert deze afwijking tot 1,5%. Dit geeft aan dat de transportkost mogelijkerwijs een geschikte heuristiek is voor model 1.

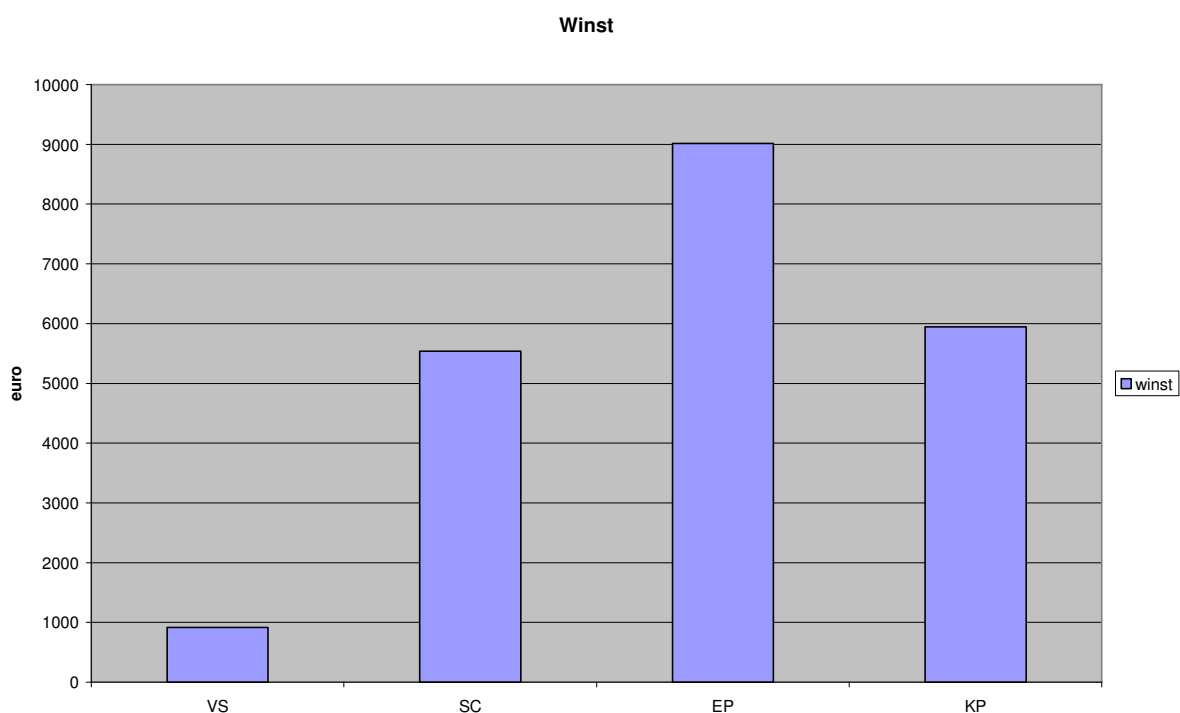
⁸ Hoewel er empirisch zeer sterke aanwijzingen zijn betreffende de correctheid van het bekomen resultaat.

Promotor: Prof. Erik Demeulemeester

Werkleider: Brecht Cardoen

2008-2009

In Figuur 9 worden de resultaten van model 1 weergegeven indien enkel VS-, SC-, EP- of KP-elementen geproduceerd worden voor een instantie van 108 elementen, 14 runs en een deadline van 4000 minuten voor elk order. Uit de grafiek blijkt duidelijk dat het produceren van enkel EP-elementen de meest winstgevende optie is, terwijl het produceren van enkel VS-elementen het minst goede resultaat geeft. Dit zou enerzijds te maken kunnen hebben met verschillen in gewicht, wat de transportkost beïnvloedt, of anderzijds met verschillen in de marge.



Figuur 9: Resultaat van model 1 voor de verschillende families

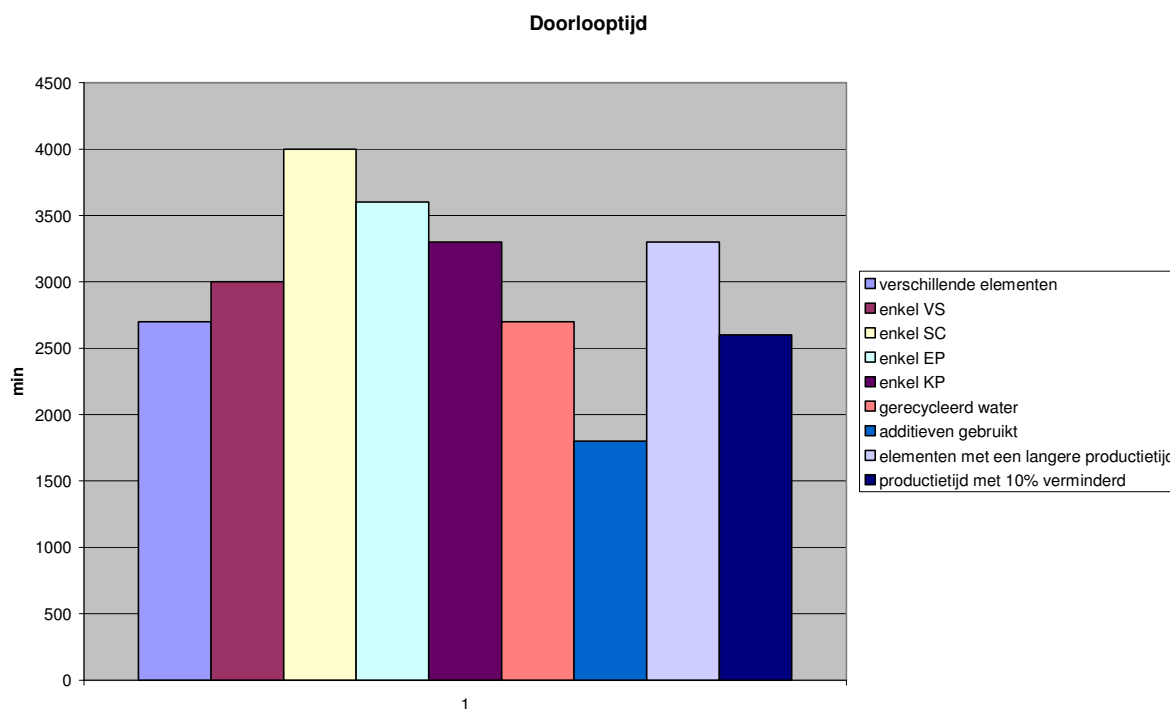
Model 4 is niet oplosbaar binnen een aanvaardbare rekentijd. Het programma werd handmatig beëindigd na 3 dagen. Hierbij moet opgemerkt worden dat dit uiteraard afhangt van de processorsnelheid van de computer. Teneinde bij benadering een resultaat te verkrijgen gelijkend op dit van model 4 werd manueel de deadline aangepast met intervallen van 100 minuten. In Figuur 10

Promotor: Prof. Erik Demeulemeester

Werkleider: Brecht Cardoen

2008-2009

wordt voor verschillende gevallen weergegeven hoe snel de 108 elementen geproduceerd⁹ kunnen worden in 14 beschikbare runs. Hierbij moet opgemerkt worden dat aangenomen werd dat er geen oplossing was indien deze niet na vier uur bekomen werd. Door het maken van deze assumptie hebben de absolute resultaten minder betekenis. De focus ligt dus op de relatieve resultaten. Ten slotte moet vermeld worden dat deze manuele aanpak absoluut niet geschikt is voor praktisch gebruik aangezien deze een enorme hoeveelheid tijd in beslag neemt. Toch werd deze manuele aanpak in de meesterproef gebruikt, aangezien een vergelijking van de vroegst mogelijke eindtijd voor de verschillende gevallen theoretisch interessante resultaten kan opleveren.



Figuur 10: Doorlooptijd van verschillende instanties

Bovenstaande grafiek geeft aan dat het gebruik van additieven een sterke daling in doorlooptijd met zich meebrengt (-33,33%). Het verminderen van de productietijd met 10% beperkt de doorlooptijd met 4%. De meest efficiënte wijze voor het doorvoeren van een vermindering van de productietijd kan

⁹ Niet noodzakelijk optimaal

Promotor: Prof. Erik Demeulemeester

Werkleider: Brecht Cardoen

2008-2009

afgeleid worden uit Sectie 3.3.1. voor Fabriek 1, Bijlage 5 voor Fabriek 2, Bijlage 8 voor Fabriek 3 en Bijlage 9 voor Fabriek 4. Uit de grafiek blijkt ook dat het produceren van enkel SC-elementen de langste doorlooptijd met zich meebrengt. Opvallend is dat er geen verschil is in doorlooptijd tussen het model met leidingwater en dat met gerecycleerd water. Dit kan enerzijds het gevolg zijn van een gebrek aan productie in Fabriek 2 (deze mogelijkheid bestaat aangezien de dataset erg klein is, in werkelijkheid zou dit niet mogelijk zijn). Anderzijds kan het zijn dat het verschil in doorlooptijd bij gebruik van leidingwater of gebruik van gerecycleerd water erg klein is. Uit de resultaten blijkt dat in beide modellen alle elementen geproduceerd worden in Fabriek 1, 3 of 4. Het model dient bijgevolg aangepast te worden teneinde het verschil in doorlooptijd bij gebruik van leidingwater en bij gebruik van gerecycleerd water te onderzoeken. Indien een extra beperking in het model opgenomen wordt waardoor alle elementen enkel in Fabriek 2 geproduceerd kunnen worden, wordt als resultaat bekomen dat de kleinste doorlooptijd van beide gevallen nagenoeg gelijk is. Hieruit kan besloten worden dat het gebruik van gerecycleerd water voor productie geen merkelijke invloed zal hebben op de doorlooptijd. De reden hiervoor is dat op een andere productiebaan in dezelfde hal op hetzelfde moment ook een element uitgehard wordt. Zoals uitgelegd in Sectie 3 en geïllustreerd in Bijlage 3 hangt de start van de volgende activiteit niet alleen af van de beëindiging van de vorige activiteit op dezelfde productiebaan, maar ook van de van de beëindiging van de vorige activiteiten op de andere productiebanen in de hal. Aangezien de uithardingsfase over het algemeen langer duurt dan de productietijd met gerecycleerd water bepaalt de uithardingstijd van de elementen op een andere productiebaan mee de doorlooptijd van de elementen op de productiebaan in kwestie. Hierdoor is het dus in bijna alle gevallen onbelangrijk of er nu met leidingwater of met gerecycleerd water geproduceerd wordt, aangezien de productietijd zelden de bottleneck is.

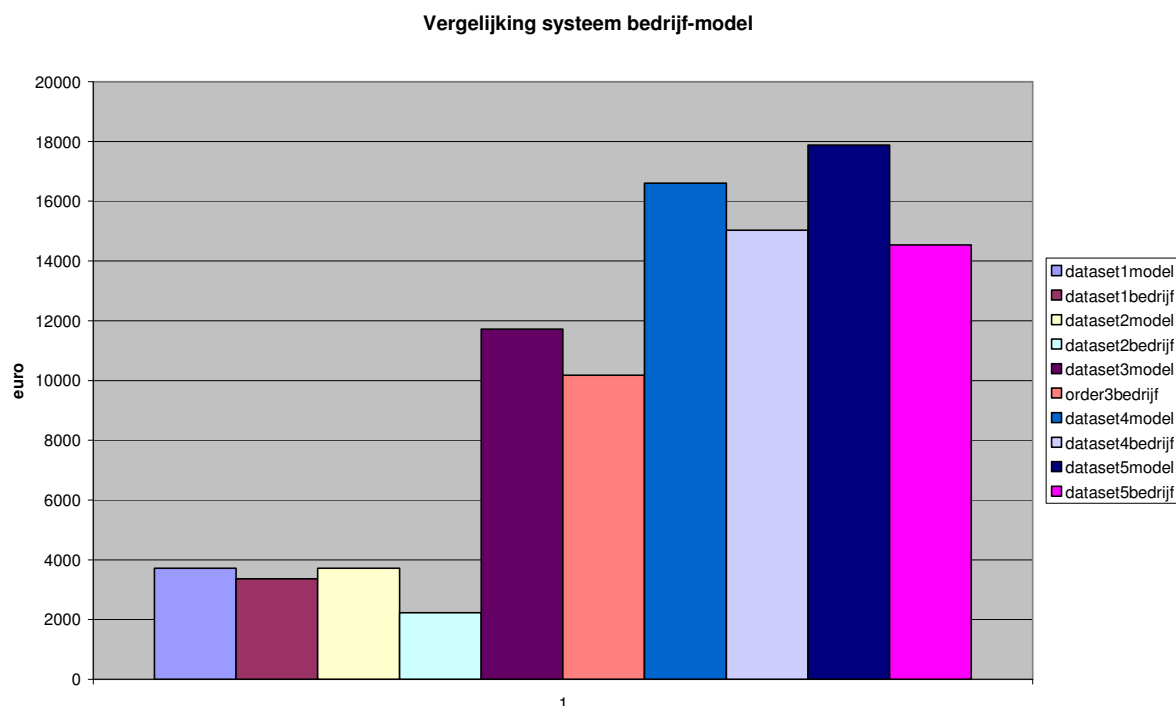
In Figuur 11 worden de resultaten vergeleken die door het model gegenereerd werden met de resultaten die via het systeem van de onderneming bekomen werden. Van de toewijzing via het systeem van de onderneming is enkel de toewijzing aan de fabriek gekend. De verdere toewijzing aan de run werd via het model gedaan. Dit is dus een best-case. In Figuur 11 worden de resultaten

Promotor: Prof. Erik Demeulemeester

Werkleider: Brecht Cardoen

2008-2009

weergegeven voor drie verschillende datasets van 108 elementen (datasets 1, 2 en 3), 1 dataset van 211 elementen (dataset 4) en een dataset van 298 elementen (dataset 5). De data die voor deze vergelijking werden gebruikt zijn –in tegenstelling tot de data die gebruikt werden bij de bovenstaande testen– werkelijke, historische data van het bedrijf. Uit de Figuur blijkt dat het model voor elk van de vijf verschillende datasets betere resultaten genereert (respectievelijk 11%, 67% , 15%,10%, en 23% beter).



Figuur 11: Vergelijking tussen het resultaat van het gebruikte systeem in het bedrijf en het resultaat van het model

6. Conclusie

Uit de resultaten kunnen een aantal duidelijke conclusies getrokken worden.

- Vooreerst werd aangetoond dat het voorgestelde model opmerkelijk betere resultaten genereert dan de resultaten die bekomen werden met het huidige planningssysteem;
- Ten tweede kan vastgesteld worden dat de transportkost een goede heuristiek is voor het probleem;

Promotor: Prof. Erik Demeulemeester

Werkleider: Brecht Cardoen

2008-2009

- Ten derde kan besloten worden dat de beperking die de hefcapaciteit van de afruimbrug in hallen 0, 1 en 2 van Fabriek 2 oplegt het resultaat nauwelijks beïnvloedt;
- Verder valt op dat het gebruik van additieven de doorlooptijd sterk kan verminderen, terwijl een lagere productietijd de doorlooptijd bijna niet beïnvloedt. Desalniettemin is het aan te raden om, indien er investeringen doorgevoerd worden, op basis van de analyse van de productietijd te bepalen welke investering de beste resultaten met zich meebrengt;
- Ten slotte kan nog opgemerkt worden dat de VS-familie veel minder winstgevend is dan de andere families. Het kan interessant zijn voor de onderneming om te onderzoeken hoe dit komt en eventueel aanpassingen door te voeren.

Om af te sluiten kan gewezen worden op het mogelijk verdere onderzoek van deze case, met name het beantwoorden van volgende vragen:

- Kunnen krachtigere computers resultaten bekomen voor grotere instanties of zijn hiervoor heuristieken nodig?
- Worden gelijkaardige resultaten bekomen indien men grotere instanties onderzoekt?
- Is het mogelijk model 4 op te lossen op een krachtigere computer?
- Kan een analyse van het oplossingsmodel de intuïtief onlogische resultaten i.v.m. de runtime verklaren?
- Laat een analyse van het oplossingsmodel toe voorspellingen te doen m.b.t. de runtime bij manipulatie van gegevens of bij manipulatie van het model?

Bibliografie

Chan F.T.S, Chung S.H., Chan P.L.Y. 2006 Application of genetic algorithms with dominant genes in a distributed scheduling problem in flexible manufacturing systems. International Journal of Production Research 44(3) 523-543.

Promotor: Prof. Erik Demeulemeester

Werkleider: Brecht Cardoen

2008-2009

- Chan, F.T.S., Chung, S.H., Chan, L.Y., Finke, G., Tiwari, M.K. 2006. Solving distributed FMS scheduling problems subject to maintenance: Genetic algorithms approach. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 22 493–504.
- Chen, Z.-L. and Pundoor, G. 2006 Order assignment and scheduling in a supply chain. *Operations Research* 54 555–572.
- Chung, S.H., et al. 2009 A modified genetic algorithm approach for scheduling of perfect maintenance in distributed production scheduling. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*
- DiNatale, M. and Stankovic, J.A. 1995 Applicability of simulated annealing methods to real-time scheduling and jitter control. In *Proceedings of the 16th IEE Real-Time Systems Symposium* 190–199.
- Herroelen, W.S. 2007. *Project and production scheduling*. Acco, Leuven
- Houtekier, S. 2004. *Plannings- en lay-out problematiek bij Echo nv*. Eindverhandeling aan de faculteit Economie en Bedrijfswetenschappen.
- Jia, H.Z., Nee, A.Y.C., Fuh, J.Y.H., Zhang, Y.F. 2003. A modified genetic algorithm for distributed scheduling problems. *Journal of Intelligent Manufacturing* 14 351–362.
- Jia, H.Z., Fuh, J.Y.H., Nee, A.Y.C., Zhang, Y.F. 2002. Web-based multi-functional scheduling system for a distributed manufacturing environment. *Concurrent Engineering: Research and Applications* 10(1) 27–39.
- Leung, S.C.H., Wu, Y., Lai, K.K. 2003. Multi-site aggregate production planning with multiple objectives: A goal programming approach. *Production Planning and Control* 14(5) 425–436.

Promotor: *Prof. Erik Demeulemeester*

Werkleider: *Brecht Cardoen*

2008-2009
