

## Economische beslissingsondersteuning bij volumeflexibiliteit

***Citation for published version (APA):***

Corbeij, M. H., & Tullemans, P. G. (1991). Economische beslissingsondersteuning bij volumeflexibiliteit. *Bedrijfskunde : Tijdschrift voor Modern Management*, 63(3), 289-302.

***Document status and date:***

Gepubliceerd: 01/01/1991

***Document Version:***

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

***Please check the document version of this publication:***

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

***General rights***

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

[www.tue.nl/taverne](http://www.tue.nl/taverne)

***Take down policy***

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

[openaccess@tue.nl](mailto:openaccess@tue.nl)

providing details and we will investigate your claim.

Ir M. H. Corbey en ir P. G. Tullemans\*

## Economische beslissingsondersteuning bij volumeflexibiliteit

### 1 Inleiding

Een aantal ondernemingen is in de laatste jaren geconfronteerd met een soms snel veranderende afzetmarkt. Voor veel van deze industriële ondernemingen betekende dit onder meer dat de prijs van produkten als afzetinstrument in betekenis afnam. Aspecten als kwaliteit, leverbetrouwbaarheid, aanpassingsgraad aan specifieke klantenwensen en de snelheid waarmee nieuwe produkten op de markt gebracht kunnen worden, werden relatief belangrijker. Soms is de klant bereid wat meer te betalen als aan deze criteria wordt voldaan, soms ook niet. Deze ontwikkelingen worden ook wel aangeduid met 'overgang van een verkopersmarkt naar een kopersmarkt', of ook wel kortweg met de dynamische markt.

Kenmerkend voor de dynamische markt is dat de ontwikkelingen moeilijk voorspelbaar zijn. Vraagveranderingen doen zich onverwacht voor en het bedrijf wordt snel afgestraft indien men niet terstond reageert op deze veranderingen. Dit terstond en ad hoc reageren kan uit commerciële overwegingen van levensbelang zijn. Vanuit de commerciële hoek is de roep om flexibiliteit dan ook vanzelfsprekend, maar de

laatste jaren zien we ook in de techniek en vooral in de logistiek dat flexibiliteit een belangrijk thema is geworden (zie bijvoorbeeld Geraerds e a., 1989; Kumpe en Bolwijn, 1990).

Het flexibiliteitsbegrip kent vele dimensies. Omwille van een heldere begripsvorming zullen wij de diverse vormen van flexibiliteit in dit artikel in kaart brengen. Slechts één van deze varianten, de volumeflexibiliteit, zal door ons worden behandeld.

In paragraaf 2 worden verschillende typen van flexibiliteit gepresenteerd en geplaatst in een integraal kader van goederenstroombeheersing. Problemen rondom volumeflexibiliteit zijn ontstaan omdat ondernemingen door de genoemde marktontwikkelingen gedwongen werden hun logistieke besturingsconcept aan te passen. Tot ver in de jaren zeventig produceerde men vooral op voorraad op basis van een voorspelling van de vraag. Het productieproces was door middel van de voorraad eindprodukten ontkoppeld van de klantenvraag.

In een dynamische marktsituatie lopen eindvoorraadposities een hoog risico van incourantheid. Voor de onderneming kan dit leiden tot lagere ontvangsten uit de verkoop van incourante eindprodukten (dumping), of tot aanzienlijke uitgaven om eindprodukten alsnog aan te passen aan de klantenvraag. Om dit risico te verminderen zijn veel ondernemingen overgegaan op het 'assemble to order'-concept: eindprodukten worden uitsluitend op basis van klantenorders geassembleerd en geleverd.

In deze situatie wordt men in het assemblage-

\* Ir M. H. Corbey is verbonden aan de vakgroep bedrijfs-economie, faculteit Technische Bedrijfskunde, Technische Universiteit Eindhoven. Hij is daarnaast actief als docent bij diverse managementopleidingen, waaronder HOFAM.

Ir P. G. Tullemans is werkzaam in een control-functie bij DAF N.V., te Eindhoven.

De auteurs danken de heren J. A. M. Theeuwes, H. J. M. van der Veeken, H. M. H. Hegge en J. W. M. Bertrand voor hun commentaar.

proces geconfronteerd met problemen rondom volumeflexibiliteit. Als de klantenvraag tegenvalt, ontstaat leegloop van assemblagecapaciteit die niet mag worden benut voor de productie van onverkochte eindvoorraad. Anderszijds kunnen pieken in de vraag leiden tot (tijdelijke) capaciteitstekorten waardoor levertijdoverschrijdingen of neen-verkopen kunnen ontstaan.

Wij zullen ons in dit artikel beperken tot de situatie waarin een onderneming geconfronteerd wordt met een onverwachte toename van de afzet waardoor capaciteitsknelpunten in het assemblageproces zullen ontstaan. De vraag is dan hoe men in deze situatie op economisch verantwoorde wijze beslissingen kan nemen over maatregelen voor aanpassing van de beschikbare productiecapaciteit (paragraaf 3). Deze beslissingen blijken dermate complex dat modelmatige ondersteuning noodzakelijk is. Methoden en technieken uit de operations research zoals lineaire programmering kunnen hierbij toegepast worden, maar niet zonder meer. Voor de invoering van deze complexe beslissingsmodellen in de bedrijfsvoering moet aan enkele belangrijke bedrijfseconomische en 'besliskundige' voorwaarden voldaan zijn. In paragraaf 4 beschrijven wij daarnaast een bedrijfskundig beslissingsmodel voor de keuze uit korte-termijncapaciteitsmaatregelen.

## 2. Flexibiliteit en logistiek; begripsbepaling

### 2.1 Typologie van flexibiliteit

Logistieke besturing heeft tot taak om de afgesproken leveringen op tijd te realiseren met een zo gering mogelijke inzet van middelen. In deze definitie staan twee begrippen centraal: 'op tijd realiseren' en 'inzet van middelen'. De onderneming die geconfronteerd wordt met toegenomen logistieke prestatie-eisen zal dus meer middelen (capaciteit en/of voorraad)

moeten inzetten om een gelijkwaardige externe prestatie te kunnen leveren. Deze externe prestatie meet men in termen van levertijd en leverbetrouwbaarheid. Waar de extra kosten optreden hangt af van het type flexibiliteit dat van de onderneming wordt geëist.

Men kan allereerst een onderscheid maken tussen *externe* en *interne* flexibiliteitseisen. *Externe* flexibiliteitseisen worden vervuld door het reactievermogen van de organisatie in relatie tot veranderingen in de vraag naar producten en diensten. Om snel te kunnen reageren moeten de deelsystemen *binnen* de organisatie, zoals het productiesysteem en het logistieke besturingssysteem, flexibel zijn. De *interne* flexibiliteit heeft betrekking op deze deelsystemen. In principe is dus niet meer interne flexibiliteit vereist dan de externe flexibiliteitseisen rechtvaardigen. Dit is uiteraard een nogal vrijblijvende constatering. Immers bij *onverwachte* externe eisen (dynamische markt!) kan men natuurlijk nooit het minimaal noodzakelijke niveau van interne flexibiliteit per deelsysteem vaststellen. Niettemin moet men zich realiseren dat verhoging van interne flexibiliteit in principe door *eindafnemers* moet worden gehonoreerd.

Er kunnen externe flexibiliteitseisen gesteld worden aan de volgende grootheden:

- het aantal productfamilies dat een bedrijf in het assortiment voert; een familie is een aggregaat van individuele typen met bepaalde kenmerkende overeenkomsten dat gezamenlijk gebruik maakt van *dezelfde* fabricagefaciliteiten;
- de totale vraag naar een familie producten;
- het aantal typen binnen een familie;
- het relatieve aandeel van de vraag naar types binnen de familie.

In de dynamische marktsituatie zullen de waarden van de bovenstaande grootheden onverwacht wijzigen. Er kunnen dan vier basisvormen van externe flexibiliteit onderscheiden worden:

- 1 *Familieflexibiliteit* wordt gedefinieerd als de mogelijkheid bij gelijkblijvende externe prestaties nieuwe, nog niet eerder voortgebrachte produkten met de bestaande fabricagefaciliteiten te vervaardigen. Voor een gegeven familie die men reeds in het assortiment voert, veranderen de karakteristieke grootheden niet; dat wil zeggen dat de bestaande produkten ongewijzigd verkocht worden.
- 2 *Typeflexibiliteit* betreft de mogelijkheid om de bestaande vaste produktiecapaciteit (bij gelijkblijvende externe prestatie) aan te passen aan een veranderd vraagpatroon van produkttypes *binnen* een familie. Men moet hierbij denken aan het volgen van de produktlevenscyclus van een produktfamilie, waarbij voor een zekere (korte) periode de totale vraag constant is, maar het totale aantal typen binnen de familie toeneemt. Dit is het geval aan het einde van de produktlevenscyclus van de familie (einde van de rijpheidsfase, begin van de vervalfase). In deze fase stagneert de groei in de vraag naar produkten; om het marktaandeel te behouden zal men het aantal typen vergroten (zie bijvoorbeeld Kotler, 1984, p. 367-372).

Het is belangrijk dat men zich realiseert dat het bij deze vormen van flexibiliteit gaat om ontwikkelingen die *vanuit de markt* worden geïnitieerd. Het gaat hier om de ontwikkeling van een nieuw type binnen de familie, of van een geheel nieuwe familie *op verzoek* van de klant. Daarnaast kan een onderneming uit strategische overwegingen ook nog niet-klantspecifieke ontwikkelingspanningen uitoefenen. Deze ontwikkelingspanningen vallen echter buiten de bovenstaande definitie van logistiek. Dit komt omdat hier nog geen externe prestaties gemeten kunnen worden in termen van levertijd of leverbetrouwbaarheid; er bestaan immers nog geen concrete afspraken met externe afnemers.

- 3 *Mixflexibiliteit* betreft het vermogen om met

het gegeven productieapparaat (bij gelijkblijvende externe prestatie) de productie aan te passen aan onverwachte wijzigingen in de vraag naar individuele typen binnen een familie. Hierbij is de totale vraag naar de familie als geheel bekend, voorspelbaar en constant. De mogelijkheid om tussen verschillende families, gegeven een constante aggregaatvraag, de produktieaantallen van de diverse families aan te passen, rekenen we ook tot mixflexibiliteit.

- 4 *Volumeflexibiliteit* omvat het vermogen om bij gelijkblijvende externe prestatie het produktievolume van een familie, gegeven het ongewijzigde aandeel van de verschillende typen binnen deze familie, aan te passen aan de actuele vraag.

In dit artikel richten wij ons op problemen rondom volumeflexibiliteit. Zoals zal blijken ontstaan deze problemen vooral als men de markt en het fabricageproces niet meer ontkoppelt door middel van voorraden eindprodukten. Opheffing van deze ont koppeling noemen we een aanpassing van het logistiek concept. Het komt neer op een stroomopwaartse verplaatsing van het zogenaamde klantenorder-ontkoppelpunt (KOOP), zie Van Hees in Monhemius en Durlinger (1989), Romme en Hoekstra (1985) of Corbey (1989).

## 2.2 Flexibiliteit en het klantenorder-ontkoppelpunt

Aan de positie van het KOOP kunnen uitspraken ontleend worden omtrent het ondernemingsrisico. Dit ondernemingsrisico is in drie dimensies uit te drukken, namelijk als verbonden aan

- levertijdverplichtingen;
- voorraadaanhouding;
- investeringen in vaste activa

Een KOOP-positie stroomafwaarts in de keten

impliceert in het algemeen een laag *risico verbonden aan levertijdverplichtingen*, de voorraden bevinden zich in gerede vorm vaak al dicht bij de afnemer. Daarnaast zal ook het *risico verbonden aan vaste activa* (niet terugverdiene constante kosten van vaste activa) niet al te hoog zijn; omdat men in grote series op voorspelling de eindprodukten aanmaakt, is een hoge bezetting van de vaste activa stroomopwaarts van het KOOP gewaarborgd. Het *ondernemingsrisico verbonden aan voorraden* is bij een dergelijke KOOP-positie echter hoog. Juist in een dynamische markt lopen eindvoorraadposities een hoog risico. Immers, vraagvolumeschommelingen kunnen leiden tot 'bederf' en onverwachte verschuivingen in de vraagpatronen (mix-, type- en familieflexibiliteit) kunnen leiden tot lagere opbrengsten uit verkoop (dumping), hoge ombouwkosten of verschroting (risico incurant).

Aanpassing van het logistiek concept betekent in dit artikel stroomopwaartse verplaatsing van het KOOP. Men kan er bijvoorbeeld voor kiezen om niet meer op centrale voorraad te produceren, maar om uitsluitend tegen klantenorders te assembleren en uit te leveren. De ont koppeling met de markt wordt dan gevormd door de voorraad onderdelen benodigd voor het assemblageproces. Deze voorraad loopt aanzienlijk minder risico, omdat ze vaak in allerlei verschillende typen eindprodukten (afhankelijk van de klantenwens) kan worden verwerkt.

Stroomopwaartse verplaatsing van het KOOP vermindert dus het ondernemingsrisico verbonden aan voorraden. Tegelijkertijd wordt het ondernemingsrisico verbonden aan levertijdverplichtingen en vaste activa verhoogd. De levertijd wordt immers verlengd met de doorlooptijd van het assemblageproces. Het ondernemingsrisico verbonden aan vaste activa neemt toe; dit heeft alles te maken met de volumeschommelingen die nu in het assemblageproces zullen optreden. Als de klantenvraag tegenvalt zal

men immers leegloop in de assemblage moeten accepteren; de productie van onverkochte eindvoorraad is in de pure 'assemble to order'-situatie uitdrukkelijk niet toegestaan. Aan de andere kant zullen vraagpieken mogelijk leiden tot capaciteitstekorten, hetgeen (tijdelijke) uitbreiding van capaciteit noodzakelijk maakt, of het gevaar van levertijdoverschrijding of neerverkoop met zich meebrengt. Als we echter de externe leverprestatie bij volumeschommelingen in de afzet constant willen houden, dan zullen we in de assemblage *onvermijdelijk* soms te veel capaciteit hebben en soms te weinig. Dit verhoogt in belangrijke mate het ondernemingsrisico verbonden aan deze capaciteit.

Thans zijn we aangeland bij de centrale vraagstelling van dit artikel. We nemen aan dat een onderneming het KOOP stroomopwaarts heeft verplaatst en uitsluitend assembleert op klantenorder. We nemen tevens aan dat dit een aanzienlijke vermindering van het ondernemingsrisico verbonden aan voorraden met zich mee heeft gebracht. Stel nu dat het produktie-management van deze onderneming wordt geconfronteerd met een onverwachte, tijdelijk toenemende vraag naar produkten. De vraag is dan: hoe kunnen deze volumeschommelingen in het assemblageproces door capaciteitsaanpassingen worden opgevangen tegen minimale extra uitgaven zonder dat de externe leverprestatie gevaar loopt?

### 3. Beslissen in een situatie van volume-flexibiliteit

#### 3.1 Structurele versus operationele maatregelen voor capaciteitsaanpassing

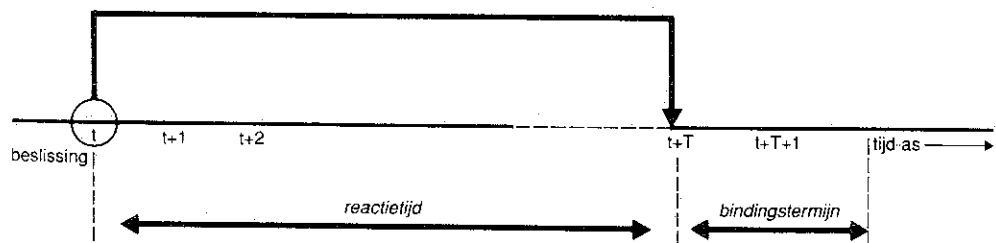
De dynamische markt dwingt het management om tijdens de produktlevenscyclus voortdurend de inrichting van het fabricageproces te heroverwegen. Wij gaan uit van een plotselinge toename van de vraag. Stel dat men bij de in-

richting van het assemblageproces was uitgegaan van een stabiele vraag ter grootte van de normale bezetting tegen rationele capaciteit. Door aanpassing van het logistieke concept is de stabiele bezetting nu niet meer gegarandeerd. Zo is de capaciteit nu onvoldoende om aan de plotselinge vraagtoename te kunnen voldoen. Doordat vraagschommelingen van deze aard niet zijn te voorzien, moet men opnieuw, in de 'going concern'-situatie, een beslissing over capaciteitsaanpassing nemen. Er zijn meerdere mogelijkheden om de voorspelde capaciteitstekorten op te vangen. De meest ingrijpende mogelijkheid is investeren in een nieuwe assemblagelijijn. Men zou óf een assemblagelijijn met grotere capaciteit in gebruik kunnen nemen met gelijktijdige afstoting van de oude, óf men zou een nieuwe lijn naast de oude kunnen installeren. In dit artikel gaan we ervan uit dat deze mogelijkheden economisch niet verantwoord zijn. Bij (conjuncturele) vraagschommelingen zal men niet kiezen voor een dermate drastische uitbreiding van capaciteit. Het geheel van uitgaven waartoe men zich bij de beslissing over zo'n maatregel onherroepelijk *verplicht*, is groot en legt veel geldmiddelen van de organisatie vast. We spreken dan van een sterke *economische binding*. Maatregelen met een hoge economische binding noemen we *structurele maatregelen*.

Maatregelen brengen meer risico met zich mee naarmate de *reactietijd* van de maatregel toeneemt. Dit heeft te maken met het feit dat het enige tijd duurt voordat capaciteitsverruimende

maatregelen hun effect hebben. Men moet reeds in periode  $t$  de beslissing nemen over een capaciteitsuitbreiding die pas beschikbaar komt in de periode  $t + T$ , waarbij de  $T$  de reactietijd van de maatregel voorstelt. Na verstrijken van de reactietijd kan de extra capaciteit overbodig geworden zijn en géén extra opbrengsten genereren. Op het beslismoment  $t$  is men echter wel 'contractueel' gebonden aan de uitgaven voor de capaciteitsmaatregel. Bij maatregelen met een lange reactietijd wordt het economisch risico behalve door de economische binding, dus ook bepaald door de mate waarin de behoefte aan extra capaciteit juist voorspeld kan worden.

Vanaf periode  $t + T$  kan de capaciteitsmaatregel pas geëffectueerd worden. Vanaf die periode levert de maatregel dus een zekere hoeveelheid capaciteitsuitbreiding op. Hierbij is het niet zo dat men dan vanaf periode  $t + T$  voor altijd aan de maatregel 'vastzit'. Men kan een capaciteitsmaatregel immers ook weer opheffen. Uit een praktijkonderzoek blijkt dat er eisen worden gesteld aan de minimale termijn waarover een capaciteitsmaatregel gehandhaafd moet blijven (Tullemans, 1989). Hier zijn vooral sociale en juridische restricties in het spel. Zo kan men zich voorstellen dat een wijziging in het ploegensysteem uit oogpunt van sociaal beleid niet meerdere malen per jaren kan worden doorgevoerd. We noemen de minimale periode waarover de maatregel gehandhaafd moet blijven de *bindingstermijn*. We vatten de begrippen reactietijd en bindingstermijn nog eens samen in figuur 1.



Figuur 1 De reactietijd en de bindingstermijn van capaciteitsmaatregelen

Gelukkig kunnen we ook andere capaciteitsmaatregelen bedenken waarbij de economische binding in het algemeen zwakker is; deze noemen we *operationele maatregelen*. Meestal zijn de reactietijden van operationele maatregelen korter; een en ander is natuurlijk afhankelijk van waar men de grens legt tussen een operationele maatregel en een structurele. In het algemeen zijn de volgende operationele maatregelen mogelijk:

- egalisatie van de vraag naar capaciteit: de op- en afbouw van capaciteitsvoorraden (eindprodukt);
- reductie van de vraag naar beschikbare capaciteit: uitbesteding van bewerkingsuren bij derden (spoedorders of doorlooporders);
- tijdelijke uitbreiding van de beschikbare capaciteit: aanpassing van de seriegrootte, een wijziging van het ploegensysteem, wijzigen van het pauzesysteem, overwerk en de inzet van een tijdelijke nachtploeg

Niet al deze maatregelen zijn echter toepasbaar in de door ons geschetste situatie. Aangezien men gekozen heeft voor het 'assemble to order'-concept is de aanmaak van capaciteitsvoorraden (waarin onverkochte eindproducten voorkomen) niet toegestaan. Hetzelfde geldt voor een verandering van de seriegrootte. Op de assemblagelijns is serievorming door verkochte en onverkochte producten bij elkaar te voegen, evenmin toegestaan. Het onderscheid tussen capaciteitsvoorraden en seriegroottevoorraden is hier feitelijk arbitrair. In de praktijk hanteert men dit onderscheid toch omdat de beslissingen over de op- en afbouw van capaciteitsvoorraden vaak op een ander niveau genomen worden dan de seriegroottebeslissingen (zie Theeuwes en Wortmann, 1985).

Aangezien de structurele maatregel vervalt, en twee operationele maatregelen (op- en afbouw van capaciteitsvoorraden eindprodukt of aanpassing van de seriegrootte) niet zijn toegestaan wegens het logistieke concept, blijft er een zestal operationele maatregelen inzetbaar

De afweging is nu welke (combinatie van) maatregelen moeten we inzetten?

#### 4. Een beslissingsmodel

##### 4.1 *Bedrijfseconomische voorwaarden*

In de praktijk worden soms OR-modellen gebruikt voor de ondersteuning van de besluitvorming op operationeel niveau. Hierbij wordt gebruik gemaakt van accountinginformatie, waarbij men soms calculeert op basis van de integrale kostprijs. Vanuit bedrijfseconomisch gezichtspunt zou dit betekenen dat alle produktiemiddelen nog aangeschaft moeten worden. Het gebruik van een beslissingsondersteunend model in de 'going concern'-situatie, dus na inrichting van het fabricageproces, vereist een nader onderzoek van de kosten die in het model moeten worden gehanteerd. Beslissingen dienen immers gebaseerd te worden op uitsluitend toekomstige geldstromen (uitgaven en ontvangsten, zie bijvoorbeeld Van der Enden, 1975). Dit maakt het noodzakelijk dat we een scherp onderscheid moeten maken tussen de initiële uitgaven voor de *aanschaf* van capaciteit, en de uitgaven die samenhangen met het *gebruik* van reeds verworven capaciteit. Een gedeelte van de uitgaven die bij hantering van de integrale kostprijs in OR-modellen (bijv. lineaire programmering) worden beschouwd, betreft initiële uitgaven voor de aanschaf van capaciteit. Deze hebben bij beslissingen in de 'going concern'-situatie *in het verleden* plaatsgevonden. Deze uitgaven mogen *niet* meer bij de optimalisering worden betrokken. We beslissen hier nadrukkelijk over het *gebruik* van capaciteit.

Deze voorwaarde geldt niet alleen voor een techniek als lineaire programmering. Ook voor bijvoorbeeld het Economic Order Quantity-model (de formule van Camp) geldt, naast andere bezwaren, het gevaar dat men uitgaven voor aanschaf en gebruik van capaciteit door

hantering van een integrale kostprijs niet onderscheidt (zie Corbey en Jansen, 1991)

In de praktijk vindt de besluitvorming veelal plaats op basis van 'cost and intuition' (Goldratt en Fox, 1986). Soms kijkt men daarbij naar interne kostprijzen of machineuurtarieven. Deze tarieven worden berekend door de financiële administratie en komen tot stand door diverse interne verrekeringen en kostentoeslagen. Een formele informatievoorziening voor logistieke beslissingen ontbreekt vaak. Het gebruik van kosteninformatie bij de evaluatie van alternatieven is misleidend en kan zelfs leiden tot economisch onjuiste besluitvorming (Theeuwes, 1987; Van der Veeke, 1988). Een uurtarief suggereert een lineair verband tussen uren capaciteit en uitgaven per maatregel. Vrijwel iedere capaciteitsverruimende maatregel levert echter een capaciteitsuitbreiding in de vorm van 'blokken' gedurende de bindingstermijn en genereert een 'blok ondeelbare uitgaven' (de economische binding). Dit betekent dat de financiële evaluatie van maatregelen gebaseerd moet zijn op verschillen in (actuele) absolute geldsbedragen van de alternatieven in plaats van relatieve prijsverschillen per produkt of per bewerking.

We kunnen dus wel gebruik maken van methoden en technieken uit de operations research, mits we bij de modelbouw rekening houden met het feit dat we niet mogen rekenen met integrale kosten en tarieven, en dat sommige maatregelen een vaste hoeveelheid capaciteit opleveren en een vast blok extra uitgaven met zich meebrengen. Hierop gaan we in de volgende paragraaf nader in.

#### 4.2 Modelbouw

Het capaciteitsprobleem waarmee het management geconfronteerd wordt in de onderzochte bedrijfssituatie, is in essentie een combinatorisch probleem. Dit kan opgelost worden met

een bijzondere vorm van lineaire programmering, namelijk gemengd geheeltallige programmering (Engels: Mixed Integer Programming). Met deze techniek wordt een lineaire doelfunctie zodanig geoptimaliseerd dat aan een aantal lineaire restricties wordt voldaan. Hierbij zijn sommige beslissingsvariabelen geheeltallig of binair. De binaire variabelen zijn bij uitstek geschikt om de 'blokken uitgaven' te modelleren. De karakteristieken van het beslissingsmodel worden hierna kort besproken. In de appendix geven we het complete model; we besteden daar ook kort aandacht aan de informatiebronnen die in een bedrijfssituatie geraadpleegd moeten worden.

Het logistieke informatiesysteem zal een beeld moeten geven van toekomstige capaciteitsknelpunten in de vorm van een capaciteitsprofiel, dat het totale, in de tijd gefaseerde, tekort aan assemblagecapaciteit (uitgedrukt in manuren) over de *planningshorizon* weergeeft. Deze planhorizon bedraagt meestal 1 jaar (= 13 periodes).

Iedere capaciteitsverruimende maatregel wordt gekenmerkt door een specifieke capaciteitsuitbreiding en uitgaven en daarnaast door een zekere reactietijd en bindingstermijn. Deze vier grootheden zijn essentieel in het model. De scala aan alternatieven met de bijbehorende reactietijden en bindingstermijnen zal per on-

Tabel 1 Reactietijd en bindingstermijn operationele capaciteitsverruimende maatregelen

Maatregel	Reactietijd (periodes)	Bindingstermijn (periode)
Roulerend drieploegensysteem	6	12
Uitbesteding (doorlooporders)	2	4
Wijziging van het pauzesysteem	1	1
Overwerk (zaterdag)	0	1
Nachtploeg	0	0.5
Uitbesteding (spoedorders)	0	1



derneming verschillen. In tabel 1 zijn de reactietijd en bindingstermijn opgesomd zoals deze in een praktijksituatie door managers zijn getaxeerd (Tullemans, 1989).

Het beslissingsmodel stelt een (optimale) combinatie van capaciteitsmaatregelen voor waarmee gedurende iedere periode  $t$  binnen de planningshorizon ( $t = 1, 2, \dots, 13$ ) de behoefte aan assemblagecapaciteit ook beschikbaar zal zijn.

Het *economisch beslissingscriterium* dat men in de assemblageomgeving mag toepassen, heeft betrekking op de minimalisering van uitgaven over de *beslissingshorizon*, onder de voorwaarde dat alle klantenorders tijdig geleverd worden. Deze beslissingshorizon is langer dan de planningshorizon (13 perioden). Hij omvat namelijk het maximum van reactietijd en bindingstermijn. Uit tabel 1 blijkt dat de beslissingshorizon 18 perioden is (wijziging ploegensysteem), terwijl de planhorizon 13 perioden omvat. Informatie over het tekort aan capaciteit vanaf planperiode 14 zal niet altijd door de module voor de capaciteitsplanning verstrekt kunnen worden. Men moet dan volstaan met risicoberekeningen van verschillende scenario's voor tekorten in het betreffende tijdvak.

De oplossing die met het beslissingsmodel kan worden berekend, is slechts een oplossingsrichting. De berekende optimale set van maatregelen wordt door de beslisser beoordeeld, rekening houdend met de indirecte effecten ervan. Deze kunnen beperkingen opleggen aan capaciteitsbeslissingen die in de toekomst genomen moeten worden (Theeuwes en De Vos, 1991). Indien de beslisser bepaalde indirecte effecten niet accepteert, is hij genoodzaakt een duurdere optie te kiezen. De extra uitgaven die hiervan het gevolg zijn kunnen echter eenvoudig en eenduidig worden bepaald.

Uit dit complexe beslissingsmodel is informatie voor de beslissers af te leiden, die in eenvoudige vuistregels kan worden gepresenteerd. Be-

sluitvorming volgens eenvoudige, doch verantwoorde regels is immers omwille van praktische hanteerbaarheid te prefereren (Monheimius, 1990).

#### 4.3 Economische vuistregels

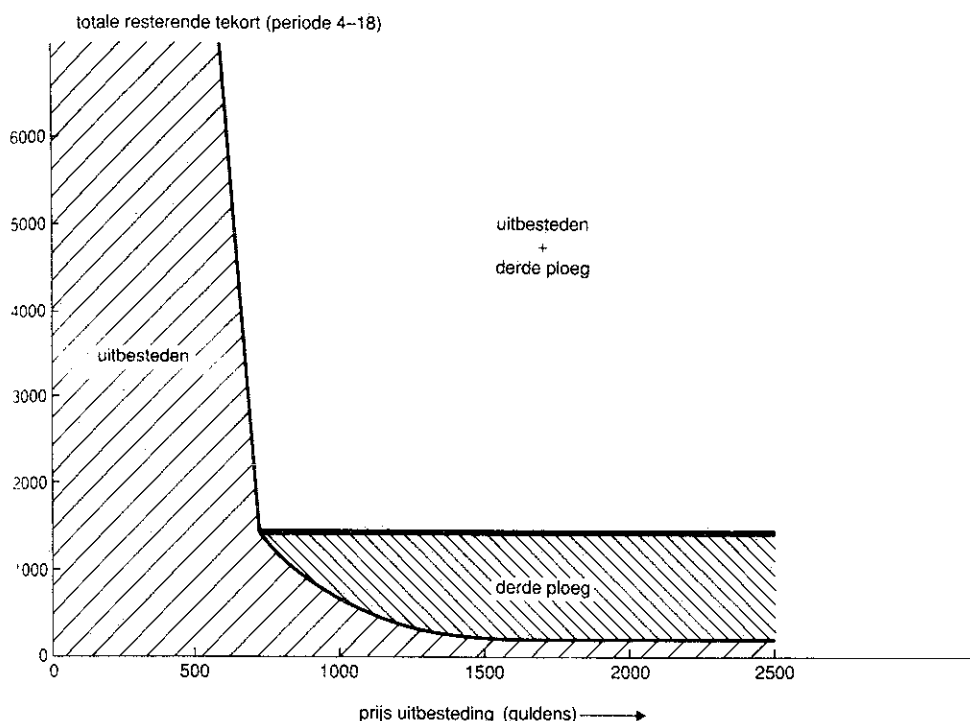
Op grond van simulatie met en analyse van het formele beslissingsmodel zijn vuistregels afgeleid. Voor een uitvoerige behandeling hiervan verwijzen wij naar Tullemans (1989). Op deze plaats volstaan wij met een voorbeeld van een beslissing: de afweging 'derde ploeg' versus 'uitbesteding op afroep'. Dit type uitbesteding betekent een capaciteitsreservering bij derden met een bindingstermijn van 4 perioden. Deze maatregel levert dus een *variabel* blok capaciteitsuren op en heeft een contractueel vastgesteld bedrag aan uitgaven tot gevolg. De inzet van een derde ploeg levert een *vast* aantal uren op tegen contractueel vastgestelde uitgaven over een termijn van 12 perioden.

Figuur 2 geeft het resultaat weer van een indifferentie-analyse die gebaseerd is op de totale uitgaven over de beslissingshorizon. Voor verschillende prijzen van uitbesteding is bepaald bij welk capaciteitstekort (gesommeerd over planperiode 4 t/m 18) de uitgaven voor uitsluitend uitbesteding en de invoering van een roulerend drieploegensysteem (samen met uitbesteding) gelijk zijn. Hierbij is verondersteld dat de periodieke tekorten vrij gelijkmatig verdeeld zijn, zonder 'extreme' uitschieters. Al deze combinaties van prijzen (per uitbesteed capaciteitsuur) en capaciteitstekorten (in uren) waarbij de uitgaven voor de inzet van ploegensysteem of uitbesteding gelijk zijn, vormen de *indifferentiecurve*.

In figuur 2 kunnen drie beslissingsgebieden onderscheiden worden:

- 1 beslissen: alles uitbesteden;
- 2 beslissen: inzet derde ploeg, restant uitbesteden;
- 3 beslissen: alleen de derde ploeg inzetten

## AFSTEMMEN VAN PRODUKTIEAANBOD EN MARKTVRAAG



Figuur 2. Economische samenhang 'uitbesteding' en 'derde ploeg'

Op ieder beslismoment kent men de prijs voor uitbesteding en kan het totale tekort aan assemblagecapaciteit berekend worden. Indien de combinatie van uitbestedingsprijs en tekort dichtbij de curve ligt, zal men moeten oppassen. Kleine wijzigingen kunnen dan de optimale oplossing veranderen. Het is dan heel goed mogelijk dat men na een zorgvuldige afweging van de indirecte effecten van beide maatregelen en van de betrouwbaarheid van de voorspellingen kiest voor de economisch niet-optimale oplossing. In de andere gevallen, voor alle combinaties die ver van de indifferentiecurve verwijderd zijn, is de keuze vanuit economisch oogpunt *onder de geldende restricties en modelveronderstellingen* verantwoord en ondubbelzinnig af te lezen uit de figuur. In de gevallen waarin de voorgestelde vuistregels niet geldig zijn (veranderingen in reactietijd of bindingstermijn), zal men eerst door simulatie

met het beslissingsmodel nieuwe economische vuistregels moeten afleiden.

Ten behoeve van de implementatie van het voorgestelde beslissingsmodel moet de informatievoorziening aangepast en geformaliseerd worden. In dit artikel laten wij de organisatorische en technische aspecten bij de invoering ervan buiten beschouwing en verwijzen wij naar Tullemans (1989).

### 5. Samenvatting

In een dynamische markt worden hoge eisen gesteld aan de flexibiliteit van een industriële onderneming. Het begrip flexibiliteit kent vele dimensies. In dit artikel hebben we ons beperkt tot volumeflexibiliteit in een 'assemble to order'-situatie.

Het blijkt dat een keuze van operationele capa-

citeitsverruimende maatregelen, gegeven de structuur van de produktiefaciliteiten, complex is. Gelet op het onzekere karakter van een dynamische markt en het hoge economische risico van structurele maatregelen kan men echter in het algemeen beter eerst kiezen voor operationele maatregelen. Modelmatige ondersteuning voor een economische evaluatie van de vele mogelijke combinaties van maatregelen is echter onmisbaar. Methoden en technieken uit de econometrie en de operations research kunnen de beslissers van dienst zijn.

Hierbij zijn twee kanttekeningen gemaakt ten aanzien van de bedrijfseconomische gegevens die bij dergelijke informatiesystemen gehanteerd worden. Vaak werken deze informatiesystemen met integrale kostprijzen en tarieven, die bij veranderingen in een 'going concern'-situatie niet geldig zijn. Daarnaast moet men zich realiseren dat sommige maatregelen een vaste hoeveelheid extra capaciteit opleveren en een extra, ondeelbaar blok uitgaven met zich meebrengen.

Er is een aantal eisen met betrekking tot de bouw van beslissingsondersteunende systemen in acht genomen. Zo zijn de uitkomsten van een simulatie voor een complexe situatie omgezet in een relatief eenvoudige grafiek waarmee de beslissers de alternatieven kunnen beoordelen. Er is aangegeven binnen welk bereik de kengetallen geldigheid bezitten (veranderingen in bindingstermijn en reactietijd).

De hier geschetste wijze van beslissingsondersteuning bij volumeflexibiliteit is dus niet alleen gebruiksvriendelijk, maar betekent ook een verbetering van de bedrijfseconomische informatievoorziening. Doordat men met behulp van dit informatiesysteem de concrete uitgaven kan doorrekenen die samenhangen met een combinatie van operationele maatregelen, wordt ook een directe afweging tussen de uitgaven voor structurele maatregelen (investering in duurzame produktiemiddelen) en operationele maatregelen gemakkelijker.

Natuurlijk spelen bij dergelijke beslissingen allerlei strategische en andere kwalitatieve effecten een rol. Omdat deze moeilijk te meten zijn, worden nog steeds eisen gesteld aan intuïtie en risicobereidheid van de beslissers. Toch is de hier voorgestelde aanpak in het voordeel; omdat de economische informatie beschikbaar is, heeft men de handen vrij om meer aandacht te besteden aan de niet kwantificeerbare effecten.

#### Literatuur

- Corbey, M. H. 'Meetbare economische gevolgen van investeringen in flexibele capaciteit', *Bedrijfskunde*, jrg 61, 1989/3.
- Corbey, M. H. en R. A. Jansen, 'Als Camp niet meer kan, wat dan?', *Bedrijfskunde*, jrg 63, 1991/2.
- Enden, C. van der, *Beslissingscalculaties*, Alphen aan den Rijn, 1975.
- Geraerds, W. M. J. (red) *Flexibiliteit in logistiek*, Samson NIVE/TUE, 1989.
- Goldratt, E. M. en R. E. Fox, *The Race*, North River Press Inc., 1986.
- Hees, R. N. van, 'Organisatie en integrale besturing', in: W. Monhemius en P. P. J. Durlinger, *Logistiek Management*, Kluwer, 1989.
- Kotler, Ph., *Marketing Management, analysis planning and control*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1984.
- Kumpe, T. en P. T. Bolwijn, 'Fabrieken met een toekomst', *Informatie*, jrg 32, 1990/11.
- Monhemius, W., 'Ontwikkelingen in de industriële logistiek', *Bedrijfskunde*, jrg 62, 1990/1.
- Romme, J. H. J. M. en S. J. Hoekstra, *Op weg naar integrale logistieke structuren*, Kluwer NIVE, 1985.
- Theeuwes, J. A. M., *Naar een bedrijfskundige bedrijfs-economie*, Intereerde Technische Universiteit Eindhoven, 1987.
- Theeuwes, J. A. M. en J. C. Wortmann, 'Produktie-management; nieuwe ontwikkelingen', *Bedrijfskunde*, jrg 57, 1985/2.
- Theeuwes, J. A. M. en A. D. de Vos, 'Winstgevendheid van flexibiliteit', *Tijdschrift voor Inkoop en Logistiek*, april 1991.
- Tullemans, P. G., *Flexibiliteit en korte-termijn capaciteitsproblemen vanuit economisch perspectief*, Afstudeer-verslag vakgroep Bedrijfseconomie, faculteit Bedrijfskunde Technische Universiteit Eindhoven, augustus 1989.
- Veeken, H. J. M. van der, 'Kosteninformatie bij logistieke beslissingen', *Bedrijfskunde*, jrg 60, 1988/1.

## AFSTEMMEN VAN PRODUKTIEAANBOD EN MARKTVRAAG

### Appendix

Allereerst worden de modelassumpties beschreven, daarna wordt het volledige model gepresenteerd

#### *Modelassumpties*

De modelassumpties beogen een vermindering van de complexiteit van het model, dus het model zal niet alle relevante aspecten van de beslissing omvatten. Aspecten die niet in het model zijn opgenomen, moeten door de beslisser zelf worden afgewogen bij de uiteindelijke keuze! Deze assumpties zijn hieronder gespecificeerd per beslissingsalternatief; hierbij wordt tevens aangegeven waar de noodzakelijke beslissingsinformatie in de onderzochte bedrijfssituatie vandaan moest komen

#### *Uitbesteding via spoedorders*

Deze vorm van uitbesteding is relatief zeer duur; er wordt van uit gegaan, dat men daarom vanaf periode 3 uitsluitend uitbestedt door middel van doorlooporders. Deze beslissing wordt dan gedurende de planning genomen. Spoedorders worden verder uitsluitend ingezet als reactie op allerhande verstoringen tijdens de uitvoering waardoor een onverwacht capaciteitstekort ontstaat dat realisatie van het assemblageprogramma in gevaar brengt. Prijzen van spoedorders werden niet als zodanig geregistreerd. In het model wordt daarom verondersteld dat spoedorders (slechts) een factor 1,5 duurder zijn dan doorlooporders.

#### *Overwerk*

Er dient een juridisch onderscheid gemaakt te worden tussen 'niet-voorspelbaar' en 'voorspelbaar, meer omvangrijk overwerk'. Het produktiemanagement werd hierover geïnformeerd door de personeelsafdeling. Voor niet-voorspelbaar overwerk dient men een vergunning aan te vragen bij de Arbeidsinspectie. Deze 'vertrouwensvergunning' heeft een geldigheidsduur/maximale bindingsduur van 1 jaar en levert een bepaalde maximale capaciteitsuitbreiding op. Dit vaste contingent uren is vrij te besteden door de week alsmede op zaterdag; *overwerken op zondag wordt niet toegestaan*. Voor overwerk gelden van rechtswege beperkingen. Maximale werktijden van 11 uur per dag, 48 uur per week resp. 180 uur per periode. Een produktieperiode omvat 152 bruto werkuren (in tweeploegendienst). Er kan per periode maximaal  $180 - 152 = 28$  uur per periode overgewerkt worden. Dit komt overeen met *maximaal drie zaterdagen per periode*. De 24 uren capaciteitsuitbreiding kan men ook door de week gebruiken, binnen de voornoemde beperkingen; deze laatste optie veroorzaakt een verwaarloosbaar verschil in geldstroomeffect ten opzichte van overwerk op de zaterdag. Verder wordt gemakshalve verondersteld dat voor het volgende kalenderjaar, voor de planningsperiode 14 t/m 18, dezelfde juridische bepalingen zullen gelden. Voor meer omvangrijk 'voorspelbaar' overwerk dient een afzonderlijke vergunning te worden aangevraagd. De vergunningsperiode is hierbij afhankelijk van het gewenste volume overwerk. Voor dit type overwerk geldt dus een zekere bindingstermijn en een capaciteitsuitbreiding, die op het moment van beslissing onbekend is. Om deze reden wordt dit type overwerk niet in het model opgenomen.

#### *Wijziging van het pauzesysteem*

Dit alternatief betreft doorwerken gedurende de vier korte pauzes van 15 minuten binnen een dienst in de fasen van het assemblageproces die de bottleneck vormen. Dit doorwerken is mogelijk door de aanname van extra personeel. Er wordt verondersteld, dat *uitzendkrachten* worden ingehuurd, zodat ervaren medewerkers in de pauzes doorwerken. Dit veroorzaakt geen problemen met verplichte rusttijden van de ervaren krachten. De prijs van uitzendkrachten was bekend bij de personeelsafdeling.

#### *Tijdelijke nachtploeg*

Het management moest de vereiste bezetting van een tijdelijke nachtploeg bepalen. Deze bezetting bepaald het blok uren capaciteitsuitbreiding en het geldstroomeffect. Daarnaast bleken er praktische moeilijkheden te bestaan met het inplannen van medewerkers in een nachtploeg (manipuleren met roosters, verplichte rusttijden). In overleg met het produktiemanagement is bepaald dat de nachtploeg als reëel alternatief werd opgenomen in het model; echter wel als een sluitpost. Wegens zeer strenge juridische beperkingen wordt verondersteld dat een nachtploeg slechts eenmaal binnen de beslissingshorizon mag worden ingezet en wel gedurende maximaal een halve produktieperiode. Gemakshalve wordt verondersteld dat dit twee weken binnen dezelfde periode zullen zijn.

## AFSTEMMEN VAN PRODUCTIEAANBOD EN MARKTVRAAG

### *Uitbesteding via doorloopporders*

Dit type uitbesteding kent een bindingsduur van vier perioden, dat wil zeggen deze uitbesteding is een externe capaciteits-reservering gedurende vier perioden. De variabele  $E(t)$  omvat een maximale reservering; deze maatregel levert daarmee *een variabel blok uren capaciteit* op en genereert *een variabel blok uitgaven*. Uitgaven als gevolg van annulering van capaciteit worden niet in ogenschouw genomen. Actuele informatie over de prijs van uitbesteding werd verstrekt door de inkoopafdeling.

### *Inzet van een roulerend drieploegensysteem*

Bij de bezetting van deze derde ploeg kan niet worden afgeweken van de bezetting in het tweeploegensysteem. Het aantal uren capaciteitsuitbreiding betreft de normale bezetting. De derde ploeg is gedurende 13 perioden actief, doch levert voor 12 perioden (bedrijfsvakantie) capaciteit op. Dus per periode  $1535/12 = 125$  netto uren. De uitgaven zijn berekend over de gehele bindingsduur van 13 perioden.

### *Definitie van variabelen*

De beslissingsvariabele  $X(t)$  representeert de beslissing op het tijdstip 'nu' om in periode  $t$  de maatregel  $X$  in te voeren. Anders gezegd:  $X(t)$  heeft betrekking op de geprojecteerde inzet van maatregel  $X$  in periode  $t$ . Men zal dan gedurende een tijdsbestek van minimaal de economische bindingstermijn aan maatregel  $X$  gebonden zijn. Het invoeren van maatregel  $X$  genereert een blok ondeelbare uitgaven. Reactietijd en bindingstermijn van de alternatieven zijn opgenomen in tabel 1 (paragraaf 4.2).

–  $U(t)$  = uitbesteding via spoedorders in periode  $t$ ,  $t = 1, 2$ .

Waardenbereik is continu.

–  $O(t)$  = Overwerk op zaterdag in periode  $t$ ,  $t = 1, 2, \dots, 18$ .

Het waardenbereik is integer (= geheeltallig).

–  $N1(t)$ ,  $N2(t)$  = tijdelijke nachtploeg gedurende een of twee aaneengesloten weken in periode  $t$ ,  $t = 2, 3, \dots, 18$ . De tijdsindex  $t$  wordt gedefinieerd vanaf periode 2, aangezien de reactietijd één bedraagt. De nachtploeg kan daarom pas geëffectueerd worden vanaf periode 2.

Het waardenbereik is binair (= nul of één). Zoals zal blijken kunnen via deze binaire variabelen de blokeffecten eenvoudig gemodelleerd worden.

–  $E(t)$  = uitbesteding via doorloopporders in periode  $t$ ,  $t = 3, 4, \dots, 18$ .

Waardenbereik: continu.

–  $P(t)$  = wijziging van het pauzesysteem in periode  $t$ ,  $t = 2, 3, \dots, 18$ .

Waardenbereik is integer.

$D(7)$  = roulerende drieploegendienst in periode 7.

Waardenbereik: binair. De variabele kan in periode 7 geëffectueerd worden. Op het actuele beslismoment is uitsluitend de beslissing om het roulerend drieploegensysteem in periode 7 in te voeren relevant.

Volgens de zogenaamde 'rollend plan'-aanpak wordt er periodiek beslist over de eerste periode beslissingen:  $U1$ ,  $O1$ ,  $P2$ ,  $N1(2)$ ,  $N2(2)$ ,  $E3$  en  $D7$ .

### *Het lineaire programmeringsmodel*

Prijzen van maatregelen die betrekking hebben op de praktijksituatie worden niet gepubliceerd. *Merk op dat iedere wijziging in reactietijd en bindingstermijn de structuur van het model verandert en noodzaakt tot een nieuwe optimalisatie.*

Opmerking over de syntax:  $\{X(t)\}$  zijn continue variabelen;  $[X(t)]$  integers;  $\{ [X(t)] \}$  binaire variabelen.

## AFSTEMMEN VAN PRODUKTIEAANBOD EN MARKTVRAAG

### Objectfunctie

$$\begin{aligned} \text{MIN! } & \{ u (U1 + U2) + \\ & o [O1 + O2 + O3 + O4 + O5 + O6 + O7 + O8 + O9 + O10 + O12 + O13 + O14 + O15 + O16 + O17 + O18] + \\ & p [P2 + P3 + P4 + P5 + P6 + P7 + P8 + P9 + P10 + P12 + P13 + P14 + P15 + P16 + P17 + P18] + \\ & n_1 [ N1(2) + N1(3) + N1(3) + N1(4) + N1(5) + N1(6) + N1(7) + N1(8) + N1(9) + N1(10) + N1(11) + N1(12) \\ & - N1(13) + N1(14) + N1(15) + N1(16) + N1(17) + N1(18)] + \\ & 2n_2 [ [ N2(2) + N2(3) + N2(3) + N2(4) + N2(5) + N2(6) + N2(7) + N2(8) + N2(9) + N2(10) + N2(11) + \\ & N2(12) + N2(13) + N2(14) + N2(15) + N2(16) + N2(17) + N2(18) ] ] + \\ & d [ [ D7 ] ] + \\ & e (E3 + E4 + E5 + E6 + E7 + E8 + E9 + E10 + E12 + E13 + E14 + E15 + E16 + E17 + E18) \} \end{aligned}$$

### Lineaire constraints

#### Upperbounds

*Overwerk* is gedurende maximaal drie zaterdagen binnen een productieperiode toegestaan op grond van een door de Arbeidsinspectie verstrekte overwerkvergunning; reactietijd en bindingstermijn zijn 1 periode.

$$\begin{aligned} O1 & < = 3 \\ O2 & < = 3 \\ O3 & < = 3 \\ O4 & < = 3 \\ O5 & < = 3 \\ O6 & < = 3 \\ O7 & < = 3 \\ O8 & < = 3 \\ O9 & < = 3 \\ O10 & < = 3 \\ O11 & < = 3 \\ O12 & < = 3 \\ O13 & < = 3 \\ O14 & < = 3 \\ O15 & < = 3 \\ O16 & < = 3 \\ O17 & < = 3 \\ O18 & < = 3 \end{aligned}$$

*Pauzesysteem.* er wordt per dienst een uitzendkracht ingezet; in een tweeploegensysteem zijn dus maximaal twee uitzendkrachten inzetbaar. De reactietijd is 1; bindingstermijn is 1 periode.

$$\begin{aligned} P2 & < = 2 \\ P3 & < = 2 \\ P4 & < = 2 \\ P5 & < = 2 \\ P6 & < = 2 \\ P7 & < = 2 \\ P8 & < = 2 \\ P9 & < = 2 \\ P10 & < = 2 \\ P12 & < = 2 \\ P13 & < = 2 \\ P14 & < = 2 \\ P15 & < = 2 \\ P16 & < = 2 \\ P17 & < = 2 \\ P18 & < = 2 \end{aligned}$$

## AFSTEMMEN VAN PRODUKTIEAANBOD EN MARKTVRAAG

*Programmerealizatie.* via de inzet van flexibele capaciteitsverruimende maatregelen dient de totale capaciteitsbeschikbaarheid de behoefte aan capaciteit te dekken; het rechterlid van de onderstaande ongelijkheden betreft het verwachte capaciteitstekort per periode

$$\begin{aligned}
 \text{PER1: } & U_1 + 8 O_1 > = 50 \\
 \text{PER2: } & U_2 + 8 O_2 + 32,5 N_1(2) + 65 N_2(2) + 20 P_2 > = 100 \\
 \text{PER3: } & E_3 + 8 O_3 + 32,5 N_1(3) + 65 N_2(3) + 20 P_3 > = 200 \\
 \text{PER4: } & E_3 + E_4 + 8 O_4 + 32,5 N_1(4) + 65 N_2(4) + 20 P_4 > = 0 \\
 \text{PER5: } & E_3 + E_4 + E_5 + 8 O_5 + 32,5 N_1(5) + 65 N_2(5) \\
 & + 20 P_5 > = 25 \\
 \text{PER6: } & E_3 + E_4 + E_5 + E_6 + 8 O_6 + 32,5 N_1(6) + 65 N_2(6) \\
 & + 20 P_6 > = 25 \\
 \text{PER7: } & E_4 + E_5 + E_6 + E_7 + 8 O_7 + 32,5 N_1(7) + 65 N_2(7) \\
 & + 20 P_7 + 125 D_7 > = 50 \\
 \text{PER8: } & E_5 + E_6 + E_7 + E_8 + 8 O_8 + 32,5 N_1(8) + 65 N_2(8) \\
 & + 20 P_8 + 125 D_7 > = 75 \\
 \text{PER9: } & E_6 + E_7 + E_8 + E_9 + 8 O_9 + 32,5 N_1(9) + 65 N_2(9) \\
 & + 20 P_9 + 125 D_7 > = 0 \\
 \text{PER10: } & E_7 + E_8 + E_9 + E_{10} + 8 O_{10} + 32,5 N_1(10) + 65 N_2(10) \\
 & + 20 P_{10} + 125 D_7 > = 100 \\
 \text{PER11: } & E_8 + E_9 + E_{10} + E_{11} + 8 O_{11} + 32,5 N_1(11) + 65 N_2(11) \\
 & + 20 P_{11} + 125 D_7 > = 100 \\
 \text{PER12: } & E_9 + E_{10} + E_{11} + E_{12} + 8 O_{12} + 32,5 N_1(12) + 65 N_2(12) & + 20 P_{12} + 125 D_7 > = 200 \\
 \text{PER13: } & E_{10} + E_{11} + E_{12} + E_{13} + 8 O_{13} + 32,5 N_1(13) + 65 N_2(13) & + 20 P_{13} + 125 D_7 > = 100 \\
 \text{PER14: } & E_{11} + E_{12} + E_{13} + E_{14} + 8 O_{14} + 32,5 N_1(14) + 65 N_2(14) & + 20 P_{14} + 125 D_7 > = 100 \\
 \text{PER15: } & E_{12} + E_{13} + E_{14} + E_{15} + 8 O_{15} + 32,5 N_1(15) + 65 N_2(15) & + 20 P_{15} + 125 D_7 > = 200 \\
 \text{PER16: } & E_{13} + E_{14} + E_{15} + E_{16} + 8 O_{16} + 32,5 N_1(16) + 65 N_2(16) & + 20 P_{16} + 125 D_7 > = 200 \\
 \text{PER17: } & E_{14} + E_{15} + E_{16} + E_{17} + 8 O_{17} + 32,5 N_1(17) + 65 N_2(17) & + 20 P_{17} + 125 D_7 > = 200 \\
 \text{PER18: } & E_{15} + E_{16} + E_{17} + E_{18} + 8 O_{18} + 32,5 N_1(18) + 65 N_2(18) & + 20 P_{18} + 125 D_7 > = 200
 \end{aligned}$$

*Juridische beperking* de nachtploeg mag slechts eenmaal binnen de planningshorizon ingezet worden; dan heeft men nog de keuze om deze gedurende 1 of 2 aaneengesloten weken in te zetten

$$\begin{aligned}
 \text{INZETNPL: } & + N_1(2) + N_1(3) + N_1(3) + N_1(4) + N_1(5) + N_1(6) + N_1(7) + N_1(8) + N_1(9) + N_1(10) + N_1(11) \\
 & + N_1(12) + N_1(13) + N_1(14) + N_1(15) + N_1(16) + N_1(17) + N_1(18) + N_2(2) + N_2(3) + N_2(3) + N_2(4) + \\
 & N_2(5) + N_2(6) + N_2(7) + N_2(8) + N_2(9) + N_2(10) + N_2(11) + N_2(12) + N_2(13) + N_2(14) + N_2(15) + N_2(16) \\
 & + N_2(17) + N_2(18) < = 1
 \end{aligned}$$

*Combinatorische beperking* de tijdelijke nachtploeg en een roulerend drieploegensysteem sluiten elkaar uit; dit geldt uiteraard vanaf periode 7

$$\begin{aligned}
 \text{NPLDPL7-18: } & N_1(7) + N_1(8) + N_1(9) + N_1(10) + N_1(11) + N_1(12) + N_1(13) + N_1(14) + N_1(15) + N_1(16) + \\
 & N_1(17) + N_1(18) + N_2(7) + N_2(8) + N_2(9) + N_2(10) + N_2(11) + N_2(12) + N_2(13) + N_2(14) + N_2(15) + \\
 & N_2(16) + N_2(17) + N_2(18) + D_7 < = 1
 \end{aligned}$$

Resumerend bevat dit complexe model 88 variabelen, waarvan 70 integers, en 55 restricties.