

**HET GEBRUIK VAN OPERATIONELE RESEARCH MODELLEN
IN DE LOGISTIEK**

J.W.M. BERTRAND¹

¹ Technische Universiteit Eindhoven, Faculteit Technische Bedrijfskunde,
Postbus 513, 5600 MB Eindhoven, The Netherlands

1. INLEIDING

Operationele Research houdt zich bezig met het formuleren en oplossen van beslissingsmodellen. Beslissingsproblemen komen voor in vele situaties en kunnen vele vormen aannemen. In de loop der jaren hebben er zich binnen de Operationele Research vele specialismen ontwikkeld. Zo zien we een onderzoekstroom die zich bezighoudt met het modelleren van bedrijfsprocessen. Hierbij is het vooral van belang om een zo valide mogelijk model van (een deel van) een bedrijfsproces te maken, in het licht van het beslissingsproces. We zien dat hier vooral statistische technieken gebruikt worden om modellen te toetsen en hun betrouwbaarheid vast te stellen. Een bekend voorbeeld hiervan is het modelleren van vraagprocessen, ten behoeve van het bepalen van de juiste voorspelfunctie.

Daarnaast zien we een onderzoekstroom die zich vooral bezig houdt met het oplossen van beslisproblemen binnen een gegeven model. Hierbinnen kunnen we weer het wetenschappelijk onderzoek onderscheiden, dat gericht is op het vinden van goede oplossingen voor bepaalde typen beslisproblemen, en de ontwikkeling van beslissondersteunende hulpmiddelen voor concrete praktijksituaties. Een bekend voorbeeld op dit laatste gebied zijn de mathematische programmeringstools die tegenwoordig commercieel beschikbaar zijn, en die snel en efficiënt gebruikt kunnen worden in de praktijk.

Een belangrijk en klassiek toepassingsveld van operationele research is de productie- en voorraadbeheersing, tegenwoordig aangeduid met de wijdere naam Logistiek. In de afgelopen decennia zijn er vele beslisproblemen op logistiek gebied onderwerp geweest van analyse en onderzoek, en er bestaat op dit gebied een omvangrijk en goed gesystematiseerde literatuur. We denken hierbij aan de voorraadbeheersing, de scheduling en sequencing, wachttijdtheorie, routeplanning, receptoptimalisatie e.d. We mogen concluderen dat een overvloed aan kennis beschikbaar is die betrekking heeft op logistieke beslisproblemen van allerlei aard. Daarnaast zien we dat in bepaalde situaties het gebruik van deze theoretische kennis sterk begint toe te nemen, met name in de detailhandel bij de optimalisatie van de assortimentssamenstelling, en in de procesindustrie bij de optimalisatie van de receptuur en materiaalgebruik. Er zijn nog vele logistieke beslissituaties waar het gebruik van operationele research modellen nog niet sterk verankerd is; zo staat b.v. de beschikbare kennis op het gebied van de sequencing en scheduling in geen verhouding tot het gebruik hiervan in de praktijk. Er zijn hiervoor een aantal redenen aan te wijzen, die vooral terug te voeren zijn op "fit" tussen het model van het probleem, zoals dat binnen de bestaande OR-theorie gebruikt wordt, en het "beeld" van het probleem zoals dat bestaat bij de beslisser of beslissers. Er zijn minstens drie mogelijke oorzaken aan te wijzen voor een slechts fit tussen "model" en "beeld".

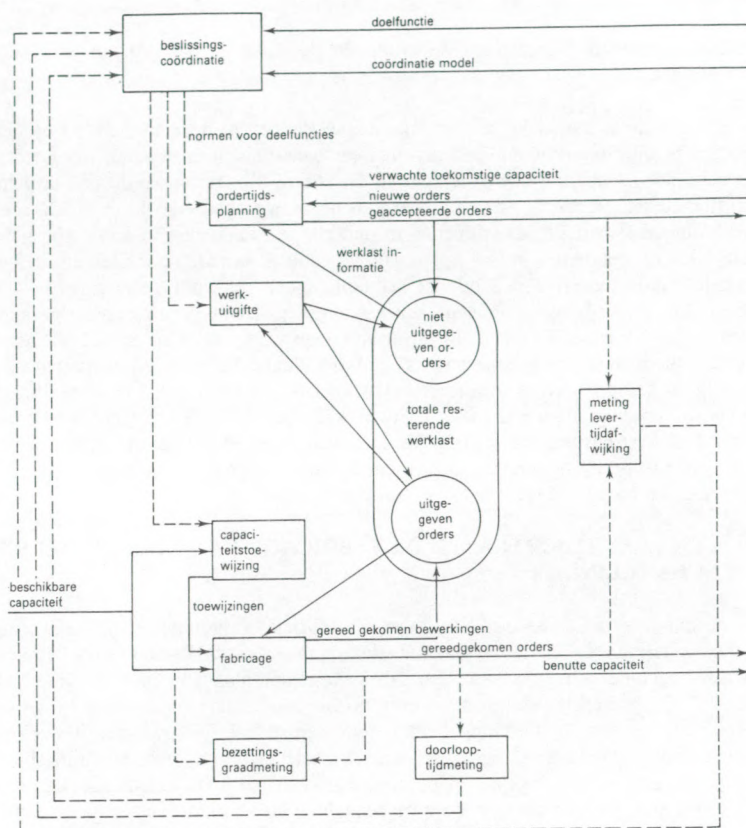
- 1) In het beeld van de beslisser bestaan er in werkelijkheid veel meer beïnvloedbare factoren en beïnvloedingsmogelijkheden, maar ook veel meer beperkingen dan er binnen het model geformuleerd kunnen worden (het beslissingsprobleem op basis van het model moet ook oplosbaar blijven). We noemen dit de modelkwaliteit.
- 2) Voor de beslisser speelt een aantal doelvariabelen tegelijk een rol, waarvan er een aantal zich niet leent voor formalisatie binnen een OR-model. In feite is het beslisprobleem niet goed structureerbaar. Vaak zien we dat in deze gevallen ook het model (oorzaak-gevolg relaties) niet goed formaliseerbaar is.
- 3) Het beslisprobleem is de gedeelde verantwoordelijkheid van een aantal beslissers, die ieder binnen een eigen beslissonderzoek handelen. Er bestaan sterke interacties tussen deelbeslisproblemen die eigenlijk ook gemodelleerd zouden moeten worden. Dit kan echter niet omdat de deelproblemen behoren tot verschillende organisatorische

werkgebieden, waarbinnen verschillende inzichten en opvattingen over het probleem bestaan.

In een complexe logistieke beheersingssituatie kunnen al deze toestanden op een of meer plaatsen tegelijk voorkomen, tezamen met een aantal situaties die zich wel goed lenen voor het gebruik van operationele research. In dit artikel illustreren we dit aan de hand van een praktijksituatie waarvoor de logistieke beheersingsproblematiek is onderzocht en de verschillende logistieke beslisfuncties in onderlinge samenhang in kaart zijn gebracht. We analyseren deze situaties m.b.t. het mogelijke gebruik van OR-modellen en -technieken. De praktijksituatie betreft een deel van het fabricageproces voor geïntegreerde schakelingen (IC's). De beschrijving is ontleend aan het ontwerp- en invoeringsproject gerapporteerd in Bertrand en Wortmann [1981]. In dit artikel gaan we speciaal in op het OR-aspect van dit project. In paragraaf 3 schetsen we de praktijksituatie in het kort. In paragraaf 4 worden vervolgens de operationele logistieke beslisfuncties (zie Bertrand, Logistieke beslissingen in de bedrijfsvoering, Bedrijfskunde, 1986) in kaart gebracht. Vervolgens wordt in paragraaf 5 elk van deze beslisfuncties onder de loep genomen, en wordt besproken in welke mate statistische technieken en operations research modellen gebruikt kunnen worden. We sluiten het artikel in paragraaf 6 af met een aantal conclusies.

2. EEN PRAKTIJKSITUATIE: DE FABRICAGE VAN GEÏNTEGREERDE SCHAKELINGEN

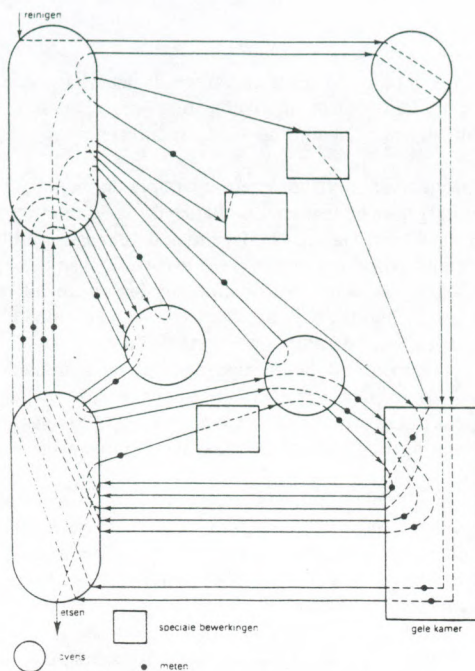
We beschouwen de diffusie-afdeling van een fabriek van geïntegreerde schakelingen. In deze afdeling worden dunne plakken silicium in een aantal fasen bewerkt op verschillende soorten machines en apparaten. De fabricage vindt plaats in partijen van maximaal 70 plakken. De bewerkingsvolgorde in elke fase is een variant op een *basis-fase routing*, die bestaat uit een ovenbewerking, gevolgd door een aantal fotografische bewerkingen in de zogenoemde "gele kamer", gevolgd door een etsbewerking, een reinigingsbewerking en opnieuw een ovenbewerking. Het resultaat van zo'n fase is, dat de elektronische eigenschappen van het silicium op zeer bepaalde plaatsen worden veranderd. Na alle fasen te hebben doorlopen bevat de plak een groot aantal complete, geïntegreerde circuits. Afhankelijk van het produkttype kunnen er 100-1.000 goede IC's (kristallen genaamd) per plak worden geproduceerd. Op een aantal plaatsen in elke fase zijn meetbewerkingen tussengevoegd. Alle achtereenvolgende fases voor een specifiek produkttype samen heet een proces. *Figuur 1* geeft een voorbeeld van een compleet proces, dat, afhankelijk van het type schakeling, 80 tot 130 bewerkingen bevat. Het aantal verschillende bewerkingen is ongeveer 400.



Figuur 1. De beheersingsstructuur van het conceptueel systeem.

De technologie van het proces en reparatie is niet volledig beheerst. Daarom ontstaat uitval. We onderscheiden hierbij plakuitval en kristaluitval; de kristaluitval kan pas worden geconstateerd tijdens de meetbewerking die na het diffusieproces plaatsvindt. De machines zijn opgesteld in werkplekken volgens een functionele lay-out: een werkplek bestaat uit technologisch verwante machines. Een operator werkt gewoonlijk op ieder moment in de tijd binnen één werkplek; hij kan soms meerdere machines van die werkplek bedienen. Een aantal operators is bovendien multi-inzetbaar over meerdere werkplekken, af en toe (bijv. 1 × per dag) kunnen zij van werkplek veranderen.

Omdat het fabricageproces uit een aantal gelijksoortige fasen bestaat leidt de functionele lay-out tot een cyclische routing, waarvan *figuur 2* een voorbeeld is. In werkelijkheid is de routing nog iets ingewikkelder, omdat een aantal meetbewerkingen op een aparte werkplek plaatsvindt. Doordat de fasen binnen een proces en de diverse processen onderling verschillen, heeft de routingsstructuur in de fabriek het karakter van een job shop.



Figuur 2. De routing van een partij in een bepaald proces.

Elke bewerking vraagt specifieke machinecapaciteit en capaciteit van een operator met een bepaalde vaardigheid. De benodigde machinecapaciteit voor een bewerking kan verschillen van de benodigde operatorcapaciteit. De totale bewerkingduur kan nog weer verschillen van zowel de benodigde machinecapaciteit als de benodigde operatorcapaciteit.

De diffusie-afdeling krijgt haar grondstoffen toegeleverd van externe leveranciers en van andere afdelingen via de *Materials Management* afdeling. Tevens fungeert het *Materials Management* als afnemer van de kristallen. In de goederenstroombeheersing wordt de afspraak gehanteerd, dat de diffusie-afdeling zich *niet* verplicht tot het *afleveren* van een bepaald aantal kristallen op een bepaald tijdstip maar tot het starten, of vrijgeven, van een bepaalde partij op een bepaald tijdstip en het garanderen van een vaste fabricagedoorlooptijd voor die partij.

Het effect van deze afspraak is dat de diffusie wel op een bepaald *tijdstip* een bepaalde vroeger opgezette partij moet afleveren, maar dat de af te leveren *hoeveelheid* producten in die partij kan fluctueren. Om deze fluctuaties op te kunnen vangen, houdt het *Materials Management* veiligheidsvoorraden aan. Bij de productiebeheersing binnen de diffusie-afdeling is de noodzaak tot direct reageren op de uitval op deze wijze geëlimineerd. Uiteraard blijft de diffusie-afdeling budgettair verantwoordelijk voor haar opbrengsten.

3. DE LOGISTIEKE BESLISFUNCTIES VOOR DE DIFFUSIE-AFDELING

Voor de beschreven diffusie-afdeling bleken de bewerkingstijden van bewerkingen binnen één

wachtrij niet erg uiteen te lopen. Om deze reden treedt het SPT-effect, dat reductie in de gemiddelde doorlooptijd kan bewerkstelligen, niet op. Daarom werd besloten de prioriteitsregel uitsluitend te richten op het reduceren van de variantie in de levertijdsafwijking.

Anderzijds biedt het inzetten van multi-inzetbare operators de mogelijkheid de relatie tussen doorlooptijd en bezettingsgraad te verbeteren. In de diffusie-afdeling werd een constante doorlooptijd per proces gewenst. Daarom besloot men de beslissing m.b.t. het inzetten van de multi-inzetbare operators geheel te richten op het verbeteren van de bezettingsgraad. Merk op, dat de capaciteitstoekenning in de diffusie-afdeling dus uiteenvalt in een zeer frequente "volgorde"-beslissing en (gemiddelde bewerkingstijd ≈ 15 minuten) en een dagelijkse beslissing over het verdelen van operators over werkplekken.

De relatie tussen deze (verbeterde) bezettingsgraad en de gemiddelde doorlooptijd per werkplek kan in de praktijk worden *gemeten*. Op grond van deze metingen kunnen haalbare normen worden gespecificeerd voor doorlooptijden en bezettingsgraden. Deze normen bepalen de vrijgavebeslissing waarmee de werklust op de vloer wordt beheerst.

Bij de vrijgavebeslissing blijkt het om diverse redenen nadelig wanneer de verdeling van de partijen over de verschillende processen (de *procesmix*) van week tot week sterk varieert. Deze nadelen uiten zich in een ongunstige relatie tussen de gemiddelde doorlooptijd en de bezettingsgraad. In Bertrand en Wortmann (1981) wordt een nauwkeurige analyse gegeven van dit verschijnsel, dat zeer specifiek is.

Om dit probleem te ondervangen is de opzetbeslissing gesplitst in twee delen: *maandelijks* wordt een norm-procesmix vastgesteld d.m.v. een productieplan, terwijl *wekelijks* de eigenlijke opzetbeslissing valt.

De maandelijkse norm-procesmix wordt door het Materials Management in een productieplan voorgesteld op grond van haar inzicht in de marktvraag en de voorraden. De diffusie-afdeling onderzoekt dit productieplan op zijn consequenties voor de bezettingsgraden. Wanneer er zodanig hoge bezettingsgraden optreden, dat de gemiddelde doorlooptijden langer dreigen te worden dan de afspraak, wordt met Materials Management onderhandeld over wijzigingen in het productieplan (uiteraard bestaan er ook regelkringen voor het aanpassen van de capaciteit, maar deze vallen buiten het bestek van dit artikel). Een zogenoemd geaccepteerde productieplan voldoet dus aan de eisen van de norm-bezettingsgraden. Op basis van dit geaccepteerde productieplan en van de norm-doorlooptijden, kan een *werklust-norm* worden berekend. Deze werklustnorm drukt per werkplek en voor de hele afdeling uit hoeveel uren werk er op een willekeurig tijdstip in de afdeling vrijgegeven mag zijn.

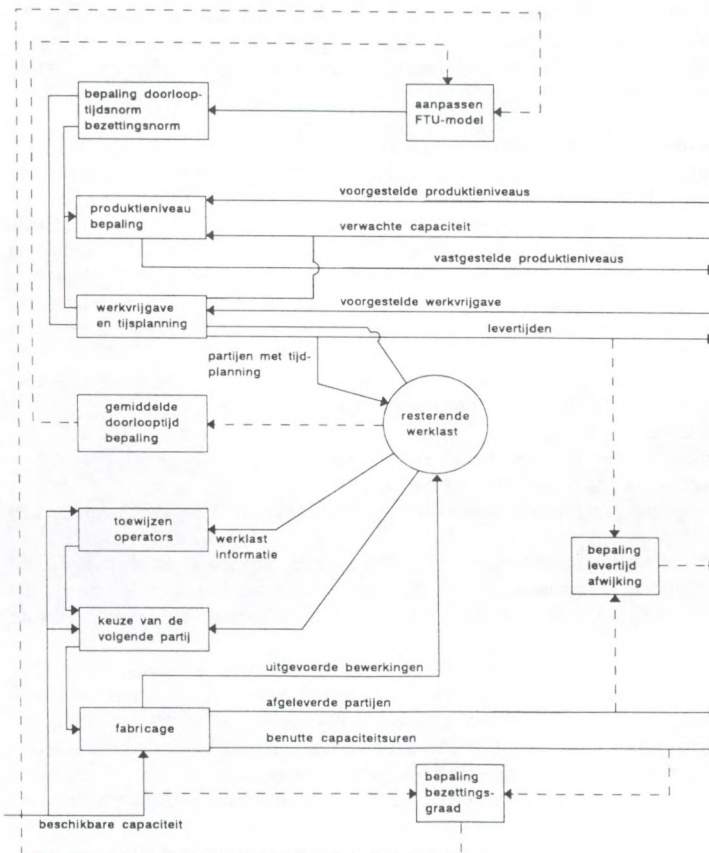
De wekelijkse vrijgave-beslissing heeft dan ook tot doel, de wekelijkse werklust zo goed mogelijk in overeenstemming te brengen met de werklust-norm, onder de voorwaarde dat de - wekelijkse - procesmix eveneens in overeenstemming is met de procesmixnorm. Via het beheersen van deze werklust wordt automatisch de gemiddelde doorlooptijd beheerst. Vandaar de naam van dit beheersingssysteem: *BeWe (Beheersing Werklust)*. Dit is een voorloper van de systemen die in de huidige literatuur CONWIP-systemen (zie Vollmann, Berry en Whybark, 1984) of BOF-Systemen (zie Wiendahl, 1987) genoemd worden.

Tenslotte zijn nog enkele opmerkingen over het systeem van order-tijdsplanning en levertijdsafgifte van belang. Men moet zich realiseren dat in deze praktijktoepassing alle niet-vrijgegeven orders onder het beheer blijven van het Materials Management. Vanuit de afdeling gezien bestaan deze orders niet.

Orderplanning en levertijdsafgifte hebben daarom niet te maken met een voorlooptijd, doch uitsluitend met een doorlooptijd. Een doorlooptijdsnorm *per proces* kan worden gegenereerd nadat de coördinatiebeslissing over doorlooptijd/bezettingsgraad-normen *per werkplek* zijn

genomen. Op basis van deze doorlooptijdnormen *per werkplek* is het eenvoudig een tijdsplanning voor iedere individuele order te maken. Deze ordertijdsplanning wordt gebruikt bij de prioriteitsstelling van de orders in de wachtrijen bij de werkplekken.

De beslissingsstructuur die hierboven is beschreven wordt weergegeven in *figuur 3*. De informatiestromen zijn eveneens aangegeven.



Figuur 3. De beheersingsstructuur voor de productie-afdeling.

4. HET GEBRUIK VAN STATISTISCHE EN OPERATIONE RESEARCH TECHNIEKEN PER BESLISFUNCTIE

Figuur 3 toont de verschillende beslisfuncties in onderling verband. We zien dat de beslisfuncties hiërarchisch geordend zijn d.w.z. elke beslisfunctie heeft betrekking op een bepaalde grootte, wordt genomen binnen condities die bepaald worden door eerder genomen beslissingen van hoger niveau, en vormt zelf weer een randvoorwaarde voor meer gedetailleerde beslissingen die nog genomen moeten worden. Elke beslisfunctie is ook toegewezen aan een of een combinatie van organisatorische posities. Dit hiërarchische systeem is resultaat geweest van het ontwerpproces waarover in Bertrand en Wortmann (1981) gerapporteerd wordt. We stellen in dit artikel niet het hiërarchisch ontwerp aan de orde, maar bespreken elke beslisfunctie zoals hij daarbinnen gedefinieerd is. We doen dit top-down d.w.z. we starten met de infrequente lange termijn beslissingen en eindigen met de hoogfrequente korte termijn beslissingen.

4.1 Het bepalen van de doorlooptijdnormen en de bezettingsnormen

In de lange termijnplanning wordt uitgegaan van de hoeveelheid productie die gerealiseerd kan worden met de (dan) beschikbare capaciteit. Op de wat kortere termijn moeten ook uitspraken gedaan worden over de doorlooptijden van de productieorders. Gegeven de harde capaciteitsbeperkingen waarmee dit soort fabrieken moeten werken, is het dus nodig het verband tussen capaciteitsbenutting en orderdoorlooptijd te kennen. De wachttijdtheorie is specifiek ontwikkeld om antwoorden op dit soort vragen te geven. We moeten ons echter wel realiseren dat de wachtrij situaties in de halfgeleiderfabriek uitermate complex zijn; we noemen de volgende factoren:

- op vele werkplekken worden productieorders gecombineerd tot efficiënte produktieruns
- partijen worden om kwaliteitsredenen soms enige tijd geblokkeerd
- er vindt reparatie van partijen plaats
- sommige machines hebben een relatief hoge storingsgraad
- vele medewerkers kunnen op meerdere werkplekken werken
- voor vele bewerkingen zijn mensen en machines nodig, echter niet van beide eventueel en op dezelfde tijdstippen
- op sommige werkplekken kunnen bewerkingen voor een deel onbemand worden uitgevoerd
- er vinden voortdurend besturingsacties plaats, zoals het verplaatsen van operators, het vrijgeven van nieuwe partijen, en het in bewerking nemen van partijen bij de werkplekken.

De toenmalige (en ook de huidige) kennis binnen de wachttijdtheorie is totaal ontoereikend om, rekening houdend met al deze factoren, vast te stellen wat bij gegeven input aan productieorders (partijen) de doorlooptijd zal zijn. Bovendien, zelfs als er voldoende theoretische kennis zou zijn, dan zou er nog zoveel onzekerheid bestaan over de kwantitatieve karakteristieken van de bovenstaande factoren, dat de waarde van de modeloutput twijfelachtig zou zijn. Bijvoorbeeld met welke "meetfout" is het model behept, waarmee we de reparatie, het blokkeren, de machinestilstand etc. modelleren?

In de jaren '80 heeft men vaak gepoogd om complexe problemen die zich niet lenen voor een analytische aanpak, aan te pakken met behulp van simulatie. Dit is slechts ten dele een oplossing voor het bovengenoemd probleem omdat we blijven zitten met de onzekerheid over de modelkwaliteit. Vaak zijn zeer uitgebreide en tijdrovende systematische simulaties nodig om betrouwbare uitkomsten te krijgen. De simulatie-aanpak is bovendien alleen effectief als er voldoende wachttijd- en theoretische kennis aanwezig is om ervoor te zorgen dat uit een beperkt aantal simulaties betrouwbare resultaten worden verkregen. Deze aanpak is in het

beschouwde onderzoek bewust niet gevolgd, met name omdat het onmogelijk geacht werd te voorspellen wat het gevolg zou zijn voor machinestilstand, operator afwezigheid, partijen-afkeur, inzet van operators e.d. als de werklast op de produktievloer op een bepaald lager niveau beheerst zou gaan worden. De verwachting was dat dit effect zou hebben, maar welke en in welke mate was niet te voorzien. Daarom werd gekozen voor een aanpak waarbij in eerste instantie het produktieniveau (aantal partijen (per week)) op het bestaande niveau werd gehandhaafd, maar waarbij wel de *mix* van de partijen over de diverse procestypes werd bewaakt teneinde te voorkomen dat de capaciteitsbehoefte van enige van de werkplekken of operators hoger zou worden dan een bepaalde fractie van de te verwachten beschikbare capaciteit. De capaciteitsbehoefte per proces en de beschikbare capaciteit werden gemodelleerd op grond van historische data die verwerkt werden met statistische methoden. De statistische analyse van deze historische gegevens alleen al leverde heel wat inzicht en maakte verschillen in doorstroomkarakteristieken duidelijk tussen processen en werkplekken. Door rekening te gaan houden met deze verschillen in de mixbewaking konden vele congestiesituaties op de werkvloer worden voorkomen. In feite heeft de toepassing van deze eenvoudige statistische technieken via het inzicht dat ontstond een grote bijdrage geleverd aan de verbetering van de beheersing.

In de jaren volgend op de invoering van de werklastbeheersing op de werkvloer via mixbewaking in de hoofdplanning, en in de onderhanden werkbeheersing bij de vrijgave ontstond er een redelijk gebalanceerde situatie; d.w.z. een situatie waarbij de vraag naar capaciteit voor de diverse werkplekken ook op de kortere termijn redelijk in overeenstemming was met de beschikbare capaciteit. Er ontstond in feite een "gesloten netwerk" wachtrijsituatie, waarin de operatorcapaciteit het overall capaciteitsknelpunt was. Er is toen een onderzoek uitgevoerd naar de bruikbaarheid van eenvoudige gesloten netwerkmodellen voor het voorspellen van het effect van de verhoging van het aantal partijen onderhanden werk op zowel de output als de gemiddelde doorlooptijd (Van Ooijen, 1989). Hierbij is gebruik gemaakt van het model van Whitt (1984), en hieruit is de volgende eenvoudige relatie afgeleid voor de diffusieafdeling van de halfgeleiderfabriek

$$p = (M-1)/(N+M-1)$$

waarbij

N = aantal partijen gelijktijdig op de vloer

M = aantal operators gelijktijdig op de vloer

p = kans dat een operator geen werk heeft.

Voor de gemiddelde output en de gemiddelde doorlooptijd gelden dan de volgende relaties:

output = $p \cdot M / c$ partijen/ploeg

waarbij c = hoeveelheid manploeg capaciteit nodig per partij

doorlooptijd = $N \cdot c / p \cdot M$ ploegen

Het was opmerkelijk dat dit eenvoudige model zeer goed zowel de bestaan de output en doorlooptijd, als de output en doorlooptijd die het gevolg was van een geplande, en later ook doorgevoerde onderhanden werkverhoging kon voorspellen. Klaarblijkelijk was ten gevolge van de balancerings van de vraag naar capaciteit op langere termijn een situatie ontstaan waarbij een relatief eenvoudig model waarin de korte termijn stochastiek en variaties wel

wordt gemodelleerd, goed toepasbaar is. Dit laatste illustreert de stelling dat het geen zin heeft OR-modellen en -technieken toe te passen op slecht beheerste en slecht gestructureerde situaties. Men dient eerst orde aan te brengen zodat er een paar sterke relaties overblijven die met behulp van het beschikbare statistische materiaal eenvoudig te modelleren zijn. Deze modellen zijn dan goed te begrijpen door de beslissers, en goed overdraagbaar in de organisatie. Het in licht van de derde factor genoemd in de inleiding, is doorzichtigheid en overdraagbaarheid, is een belangrijk kenmerk van een model voor de relatie tussen onderhanden werk, doorlooptijd en output. Immers dit model moet "gedeeld" worden door twee "partijen" in de organisatie. Enerzijds moet de materials manager (en zijn organisatie) dit model accepteren en de resulterende produktieniveau- en mixbeperkingen hanteren bij zijn beslissingen, anderzijds moet de afdelingschef (en zijn organisatie) de resulterende onderhandenwerknorm hanteren bij zijn wekelijkse en dagelijkse beslissingen over de vrij te geven nieuwe partijen. Met een complex en ondoorzichtig model zou het moeilijk zijn beide organisaties op één lijn te houden, gegeven de dynamica in de gevoerde fabricageprocessen en de gebruikte produktiemiddelen op de vloer.

4.2 De maandelijkse produktieniveaubeslissingen

Gegeven de benodigde man- en machinecapaciteit per proces (rekening houdend met de effecten van reparatie en uitval) en de beschikbare man- en machinecapaciteit per maand (rekening houdend met de effecten van machinestilstand, multi-inzetbaarheid en benodigde capaciteitspeling) is het mogelijk een formeel model op te stellen dat de vraag naar capaciteit in een voorgesteld maandplan toetst aan de beschikbare capaciteit. Conceptueel is dit een zeer eenvoudig model dat vergelijkbaar is met de rough-cut capacity check zoals die voorkomt in de MRP-II pakketten. Oorspronkelijk werd gewerkt met een verzameling beperkingen op de beschikbare capaciteit waarin rekening werd gehouden met de bestaande complexe inzetbaarheidsstructuur van de operators. Hiertoe is door Wortmann (zie Bertrand en Wortmann, 1981, hoofdstuk 10) een algoritme ontwikkeld, gebruik maken van de gelijkenis van dit probleem met de structuur van transportproblemen en netwerkproblemen. Tijdens het gebruik van het resulterende capaciteitsmodel bleek het model voor vele betrokkenen moeilijk interpreteerbaar. Gebruikelijke begrippen zoals "bezettingsgraad" waren niet te gebruiken voor vele van de capaciteitsbeperkingen in het model en ook was het moeilijk een relatie te leggen tussen beschikbare capaciteit, de gevraagde capaciteit en de verwachte doorlooptijd per werkplek.

Alhoewel het model vanuit OR oogpunt een goede beschrijving gaf van de situatie, was het toch niet bruikbaar, omdat het conceptueel niet aansloot bij de andere concepten en "beelden" die de verschillende gebruikers hanteerden. Er werd daarom besloten om gelijktijdig de werkelijkheid en de modellen te vereenvoudigen. Dit gebeurde door via opleiding en training de inzetbaarheidsmatrix zodanig te vullen dat er gewerkt mag worden met capaciteitsbeperkingen per bewerkingsoort, per werkplek en per afdeling. In deze modellen wordt een deel van de bestaande flexibiliteit niet weergegeven; ze tonen dus een onderschatting van het produktieve vermogen, met name met betrekking tot de mix van processen die verwerkt kan worden. Bij nader inzien werd dit niet als hinderlijk ervaren omdat deze extra flexibiliteit goed gebruikt kan worden om korte termijn verstoringen in de beschikbare capaciteit op te vangen en omdat de mixflexibiliteit die resulteert uit het vereenvoudigde model ruim genoeg bleek te zijn om de door de markt gevraagde mixvariëaties op te kunnen vangen.

Het resulterende eenvoudige model kon worden gesteld in termen die goed aansloten bij de andere begrippen en concepten die gehanteerd werden door de materials management organisatie en het management van de produktie-afdeling.

Noot: Er is in de eerste fase van het onderzoek overwogen om een optimaliseringsmodel te ontwikkelen dat gebruikt kan worden om bij gegeven capaciteitsbeperkingen vast te stellen welke de optimale mix van partijen. De doelstellingen voor deze beslissingsfunctie waren echter zo divers en complex, sterk wijzigend in de tijd en afhankelijk van de context dat al vlug besloten werd dit pad te verlaten en te volstaan met ondersteuning via een capaciteitsbeschikbaarheidscheck.

4.3 De ordervrijgave via Werklastbeheersing

Gegeven de geaccepteerde produktieniveaus en -mix en gegeven de gewenste doorlooptijden per werkplek, is het vrij eenvoudig om vast te stellen hoeveel uren werk er gemiddeld per machinesoort, per werkplek en voor de afdeling als geheel op de werkvloer, vrijgegeven maar nog niet verzet, aanwezig moet zijn. Op grond van deze gemiddelden worden werklastnormen opgesteld. Vervolgens wordt bij het vrijgeven van nieuwe orders ervoor gezorgd dat de werkelijke werklast nooit hoger wordt dan de norm.

Nu zal ten gevolge van de vele korte termijn verstoringen en variaties die zullen optreden de werkelijke werklast rond de gemiddelde waarde gaan schommelen. Om die reden moet er bij de vrijgavebeslissing een (boven)grenswaarde worden gehanteerd die een functie is van de onvermijdelijk optredende variaties in werklast. Deze variaties zijn niet of nauwelijks betrouwbaar af te leiden uit de veroorzakende verstoringen, met name omdat er voortdurend op de werkvloer gestuurd wordt om de effecten van de variaties zoveel mogelijk teniet te doen. Het enige dat dan overblijft is het registreren van de werklastvariaties en via statistische analyse schatten van de parameters. Deze kunnen vervolgens gebruikt worden om signaleringsgrenzen (b.v. een 5% overschrijdingskansgrens) te bepalen die gebruikt kunnen worden om bij de ordervrijgave vast te stellen of een werkpakket acceptabel is of niet. We moeten ons hierbij realiseren dat deze werkwijze in feite niet is toegestaan, aangezien een van de werklastvariatiebronnen nu met de werkordervrijgave beslissing zelf is. In de praktijk is de oplossing gevonden door op totaal afdelingsniveau te eisen dat de werklast na de vrijgavebeslissing precies gelijk is aan de norm, maar op werkplek- en machineniveau een signaleringsgrens te gebruiken die hoger is dan de gemiddelde werklast, en door geleidelijk aan de parameters van de werklastvariatieschatters geleidelijk aan te passen aan de kleiner wordende variaties t.g.v. het gebruik van werklastbeheersing. (Inmiddels heeft deze werkwijze in vele fabrieken in een of andere vorm ingang gevonden. Wiendahl rapporteert bijvoorbeeld in zijn boek een aantal geslaagde implementaties van dit concept, weliswaar gebaseerd op iets andere werklast concepten, maar dat is niet cruciaal (Wiendahl (1987)).

De wetenschappelijke discussie gedurende het afgelopen decennium rond werklastbeheersingstechnieken werpt een verhelderend licht op de toepasbaarheid van OR in de productiebeheersing. Werklastbeheersing kent verklaarde voor- en tegenstanders. De voorstanders wijzen terecht daarbij op de positieve effecten m.b.t. efficiency, kwaliteit en doorlooptijd die waargenomen worden in vele praktijksituaties waar werklastbeheersing is ingevoerd. Tegenstanders wijzen terecht op het feit dat binnen een wachtrijmodel, bij gegeven orderstroom inclusief leverdata, het introduceren van een vrijgavebeslissing gericht op het voorkomen van een te hoge werklast, uiteindelijk alleen maar doorlooptijd verlengend kan werken, indien ook de wachttijd vóór vrijgave tot de orderdoorlooptijd gerekend wordt. Dit kan gemakkelijk worden aangetoond op basis van wachtrijmodellen van de productieafdeling. De vraag is nu hoe de waargenomen verbeteringen in de praktijk verklaard kunnen worden. Is er enkel sprake van een Hawthorn-effect, of treden er onder invloed van werklastbeheersing andere mechanismen in werking die niet gemodelleerd worden met een klassiek wachtrijmodel? De algemene indruk is dat dit laatste het geval is. In dit artikel werd b.v. waargenomen dat pas nadat de werklast flink was verlaagd, de bazen geneigd waren de

multi-inzetbaarheid van hun operators te gebruiken. Ook werd waargenomen dat de terugkoppeltijd met betrekking tot de kwaliteit van de uitgevoerde bewerkingen aanmerkelijk korter werd, waardoor de hoeveelheid afkeur aanmerkelijk afnam. Soortgelijke waarnemingen worden ook elders gedaan.

In complexe produktiesituaties blijkt werklastbeheersing dus interessante en belangrijke effecten te hebben. We moeten ons realiseren dat deze effecten nooit waargenomen zouden zijn als we op grond van de bestaande wachtrijmodellen geconcludeerd zouden hebben dat werklastbeheersing geen zin heeft, en het dan ook nooit zou hebben geprobeerd. Dit pleit ervoor OR ook en vooral op te vatten als een wetenschap die zich bezig houdt met de systematische waarneming, analyse en verklaring van operationele processen. In die zin zou werklastbeheersing een produkt hebben kunnen zijn van OR, in plaats van een tegen de klassieke OR-verdrinking in vanuit de praktijk ontstane werkwijze. Net zoals bij de ontwikkeling van MRP-systemen (Orlicky, 1975), Just in Time Manufacturing (Schönberger, 1981), en Time Based Competition (Stalk en Hout, 1990) zien we dat de praktijk leidend is bij de ontwikkeling van nieuwe concepten en methoden. Daaruit valt een les te trekken voor het vakgebied Operations Research.

4.4 De operator capaciteitstoe wijzing

De flexibele operatorcapaciteit wordt gebruikt om de capaciteit per werkplek op korte termijn aan te passen aan de behoefte. In de praktijk van de halfgeleiderfabriek werd deze beslissing per ploeg genomen. Bij het aantreden van een nieuwe ploeg wordt beslist over de inzet van mensen. Verder komt het af en toe voor dat er gedurende de ploeg nog wordt toegewezen. Ten behoeve van de ondersteuning van deze beslissing werd gedurende het project een model ontwikkeld ter voorspelling van de capaciteitsbehoefte op grond van de werkvoorraad in de wachtrij en een toewijzing van operators aan werkplekken. Bij de opzet van dit model is even overwogen hiervoor een echt simulatiemodel te gebruiken d.w.z. een event-oriented model dat het gedrag van de orders, machines, wachtrijen, operators en de interactie tussen deze grootheden modelleert. Dit werd al snel verworpen op grond van de volgende reden.

Vele toekomstige externe events zijn stochastisch van aard; in een simulatie neemt men telkens maar één reeks realisaties mee. De uitkomst wordt dan ook in hoge mate bepaald door die reeks realisaties. We zouden dan in feite zeer veel zeer korte simulaties moeten uitvoeren per scenario van toewijzing van operators. Uit een analyse van het effect van een toewijzing, en de robuustheid van dit effect voor verschillende verstoringpatronen zou dan moeten volgens wat de "beste" toewijzing is.

De benodigde simulatiecapaciteit en het benodigde analysevermogen was in die tijd zeker niet toereikend voor deze aanpak. Om die reden is een andere aanpak gekozen waarbij de capaciteitsbehoefte voor de komende ploegen over een zekere horizon geprognostiseerd wordt op grond van de actuele status en een "normale" doorstromingsnelheid van de partijen, waarbij de relatieve voor- of achterstand van de partijen t.o.v. de norm in een zeker tempo gecorrigeerd wordt. De gedachte hierachter is dat er bestaande voortgangsverschillen op den duur zullen verdwijnen (er ontstaan natuurlijk weer nieuwe verschillen t.g.v. allerlei verstoringen). Verder veronderstelt deze aanpak dat er voor de aldus geprognosticeerde capaciteitsbehoefte, via de operatorinzet, in elke periode bij elke werkplek voldoende capaciteit kan worden gecreëerd. In dat geval lijkt het veronderstelde doorstroomgedrag van de partijen gewettigd.

Dit nogal speculatief model (dat overigens veel lijkt op de output van de detailed capaciteit planning module van MRP-II systemen, zie Vollmann, Berry en Whybark, 1984)) is gedurende 7 perioden van 4 weken) getoetst op zijn voorspelkwaliteit. De voorspelkwaliteit werd gemeten door per dag voor de eerstvolgende ploeg de voorspelde hoeveelheid

werkaanbod (in uren) te vergelijken met het werkelijke werkaanbod gedurende diezelfde periode. Als maat voor voorspelkwaliteit is de correlatiecoëfficiënt gebruikt; als referentie werd gebruikt de 95% significantie waarde van de correlatiecoëfficiënt. Tabel 1 laat de resultaten zien voor de drie grootste werkplekken.

Tabel 1. De voorspelkwaliteit van het prognosemodel.

Periode	Gele kamer		Etsen en Reinigen		Ovens		Aantal waarnemingen per periode
	correlatie-coëff.	95% sign. waarde	correlatie-coëff.	95% sign. waarde	correlatie-coëff.	95% sign. waarde	
1	0.53	0.40	0.65	0.40	0.70	0.40	18
2	-0.06	0.40	-0.21	0.40	0.59	0.40	18
3	0.32	0.40	-0.10	0.40	0.19	0.40	18
4	0.56	0.39	0.67	0.39	0.40	0.39	19
5	0.32	0.40	0.14	0.40	0.50	0.40	18
6	0.58	0.40	0.22	0.40	0.27	0.40	18
7	-0.10	0.39	-0.22	0.39	-0.13	0.39	19

We zien dat er tijdvakken voorkomen waar de correlatie significant en soms zelfs redelijk hoog is. Echter er zijn ook tijdvakken dat het model helemaal niet goed werkt. Verklaringen hiervoor kunnen gevonden worden in het voorkomen van langdurige machinedefecten op bepaalde plekken, het voorkomen van relatief veel reparatie gedurende bepaalde tijdvakken e.d. Er is echter geen gedegen onderzoek gedaan naar de verklaring van de sterk wisselende voorspelkwaliteit. In plaats daarvan is besloten om de inzet van de operators niet te baseren op de prognose van het werkaanbod, maar op de actuele werkvoorraad bij aanvang van de ploeg, in combinatie met het aantal beschikbare operators en machines. Gedurende de invoering van de werklustbeheersing en na de reductie van het onderhanden werk bleek bovendien dat meer en meer reallocaties gedurende de ploeg werden uitgevoerd, meestal om leegloop van operators te voorkomen. Dit mechanisme vroeg nauwelijks nog extra formele beslissingsondersteuning, afgezien van de onderlinge communicatie over de werkvoorraden tussen de bazen.

Op grond van bovengenoemde ervaring met een prognosemodel van capaciteitsbehoefte en werkaanbod kan men grote vraagtekens stellen bij de toepasbaarheid van de OR-methoden en -technieken op het gebied van de gedetailleerde capaciteitsplanning en -besturing. De ervaring die bij de Philips fabriek in Leeuwarden werd opgedaan met het OPT-systeem, ook een gedetailleerde capaciteit- en orderplanningssysteem wijst in dezelfde richting (zie Atema (1989), en ook Bertrand, Wortmann, Wijngaard (1990), hoofdstuk 20). De OPT-methodiek bleek uiterst gevoelig voor verstoringen, afwijkingen en modelfouten (de bekende system-nervousness). Vaak bleek de feitelijke voortgangssituatie op de werkvloer na een paar dagen al zeer sterk af te wijken van de aan het begin van de week geprognosticeerde situatie.

4.5 De volgordebepaling

Bij de bepaling van de volgorde waarin de partijen bij de werkplekken in bewerking moeten worden genomen, spelen zowel efficiency als kwaliteit en leverbetrouwbaarheidsoverwegingen een rol. Er bestaat een overweldigende hoeveelheid literatuur op het gebied van de sequencing en scheduling, zowel voor statische als dynamische en stochastische situaties. Gegeven het relatief hoge verstoringniveau, en korte termijn onzekerheid in de produktieafdeling is gekozen voor een eenvoudige prioriteitsregel waarin het criterium tijdigheid gecombineerd is met efficiency. Per werkplek werd vastgesteld wat een redelijke gemiddelde wachttijd is, gegeven de wachtrijsituatie en gegeven de noodzaak om al of niet partijen te kunnen combineren in produktieruns. Hierbij werd gebruik gemaakt van eenvoudig benaderende modellen. De hieruit volgende gemiddelde wachttijd werd als speling gehanteerd in de voorwaartspianing van de bewerkingen van de vrij te geven partijen, hetgeen resulteerde in uiterste bewerkingsplandata per bewerking. Vervolgens werd als prioriteitsregel gehanteerd dat voorrang moet worden gegeven aan partijen waarvan de uiterste plandatum reeds is overschreden en dat vervolgens de partijen worden verwerkt in volgorde van plandatum. Partijen die nog voorliggen op hun plandatum mogen eventueel uit efficiency-overwegingen worden gecombineerd; meestal echter kan men volstaan met combineren van orders met dezelfde plandatum (= 1 dag).

Deze eenvoudige regel bleek goed te werken, en leidde na invoering tot een halvering van de spreiding in de doorlooptijd van de partijen. Er is verder niet gezocht naar mogelijkheden om het combineren beter te ondersteunen of om rekening te kunnen houden met het Work-in-Next-Queue effect. Gedurende de periode waarin het project werd uitgevoerd was er nog geen sprake van real-time, on-line beschikbaarheid van voortgangsinformatie. De gegevensverzameling verliep nog met de hand en werd geconsolideerd met gemiddeld een halve dag achterstand. Het zal duidelijk zijn dat een dergelijke informatieachterstand dodelijk is voor de ultra-korte termijn beslissingen in zulk een dynamische situatie. We mogen aannemen dat het met de huidige beschikbare shopfloor control systemen veel beter mogelijk is om beslissingsondersteuning te geven aan de ultra korte termijn beslissingen. Echter het blijft nog een open vraag hoe deze beslissingsondersteuning eruit moet zien, en hoe rekening gehouden kan worden met de soms sterk wijzigende beslissingscontext (waarderingscriteria, verstoringpatronen, reparatiegedrag e.d.). Voorlopig blijft de stelling verdedigbaar dat ook voor de korte termijn beslissing OR-methoden en -technieken niet meer een deel of aspect van het gehele probleem kunnen afdekken, dat het nodig blijft dat het OR-model goed geïnterpreteerd kan worden door de beslisser, en dat hij het model en zijn context kan inpassen in zijn eigen beeld van het probleem. Dit stelt waarschijnlijk zeer bijzondere eisen waarvan de consequenties nog niet geheel worden overzien (zie ook A.A. den Boer, proefschrift TUE 1992). Recent gestart onderzoek aan de TUE moet meer duidelijkheid hierover gaan verschaffen.

5. CONCLUSIE

In dit artikel hebben we de OR en statistische aspecten besproken van een in de praktijk ontwikkeld produktiebeheersingssysteem. We hebben eerst geformuleerd aan welke eisen beslissings ondersteuningsmodellen dienen te voldoen. Daarna hebben we de te beheersen situatie en het beheersingssysteem in grote lijnen beschreven. Vervolgens hebben we voor elk van de beslisfuncties binnen het beheersingssysteem nagegaan in welke mate er gebruik gemaakt is van modellen en technieken uit de OR en statistiek, en in welke mate dit succesvol was. We mogen concluderen dat het succes nogal wisselde, dat vooral eenvoudige modellen en technieken succesvol waren. Bovenal echter, lijkt de ervaring met het project

de stelling te ondersteunen dat de Operationele Research zich veel meer als een empirische wetenschap zou moeten opstellen, dan als een normatieve wetenschap, d.w.z. ze zou veel meer gericht moeten zijn op het kritisch observeren van de werkelijkheid, deze ordenen en systematiseren, en hieruit conclusies trekken over welke methode of techniek in welke situatie goed werkt, in plaats van gericht op het ontwikkelen van optimale oplossingen voor modellen van problemen in de werkelijkheid.

LITERATUUR

1. Atema, F.A. (1989). De invoering en evaluatie van OPT in de metaalwarenfabriek van Philips Leeuwarden. Afstudeerrapport TUE, faculteit Bedrijfskunde.
2. Bertrand, J.W.M. en J.C. Wortmann (1981). *Production Control and Information Systems for Component Manufacturing Shops*. Elsevier, Amsterdam.
3. Bertrand, J.W.M., Wortmann, J.C. en Wijngaard, J. (1991). *Productiebeheersing en Materials Management*. Stenfert Kroese.
4. Boer, A.A. den (1992). *Beslissingsondersteuning voor Materiaalplanners*. Proefschrift TUE.
5. Ooijen, H.P.G. van (1989). *Consequenties van werklastverhoging voor de doorlooptijd en de output van diffusie IC-bipolair*. Intern rapport TUE/BDK/KBS/C89-05.
6. Orlicky, J. (1981). *Materiaal Behoeft Planning*. Kluwer Technische Boeken.
7. Schönberger, R.J. (1982). *Japanese Manufacturing Techniques*. The Free Press.
8. Stalk, G. en T.M. Hout (1990). *Competing against Time*. The Free Press, New York.
9. Vollmann, T.E., W.L. Berry, en D.C. Whybark (1984). *Manufacturing Planning and Control Systems*. Dow Jones-Irwin.
10. Whitt, W. (1984). *Open and Closed Models for Networks of Queues*. AT&T Bell Laboratories, Technical Journal, Vol. 63, No. 9.
11. Wiendahl, H.P. (1987). *Belastungsorientierte Fertigungssteuerung*. Carl Hansen.

