

Simulation af et produktionsstyringssystem

Af SVEND KRÆMER*)

1. Introduktion

Simulation kan undertiden være et nyttigt hjælpemiddel til analyse og forståelse af komplicerede systemer, hvorved en forbedret styring eventuelt kan opnås. Vi skal i denne artikel konstruere en simulationsmodel til illustration af de styringsaktiviteter, som foregår i en produktionsvirksomhed. Set ud fra en realistisk synsvinkel er der foretaget visse forenklinger af problemstillingen. Vi antager imidlertid, at virksomheden fremstiller flere færdigvaretyper, hvortil der medgår flere eventuelt fælles råmaterialer. Men endvidere antages det, at der kun kan fremstilles een varetype i løbet af en planlægningsperiode (f. eks. en uge). Efterspørgslen antages at være stærkt sæsonpræget og påvirket af modesvingninger.

De ligninger, som indgår i modellen og som beskriver de forskellige relationer mellem styringsaktiviteterne i produktionsvirksomheden, danner grundlaget for et edb-program. Udskrifter fra dette program er anført i afsnit 7 til illustration af, hvorledes forskellige strategiske beslutningsregler påvirker såvel virksomhedens evne til at imødekomme efterspørgslen som det økonomiske resultat for en bestemt tidsperiode.

Modellens kardinalpunkter udgøres af arbejdsstyrke-, produktions- og råmaterialebeslutningerne. Disse tre beslutningstyper er kvantificerede i henhold til især, Holt, Modigliani, Muth og Simon's lineære beslutningsmodel [4]. Det er imidlertid ikke formålet her at løse produktionsstyringsproblemet analytisk (en sådan løsning er udviklet i [4]), men derimod at beskrive forskellige måder, som et bestemt produktionssystem kan styres efter, samt at udvikle et edb-program til simulation af styringsaktiviteterne i et forenklet produktionssystem. Formålet er imidlertid også at give læseren et indtryk af de krav, som et integreret produktionsstyringssystem stiller til indhold og organisation af virksomhedens informationssystem.

*) Cand. merc., The University of Wisconsin, Madison.

Simulation af et produktionsstyringssystem

Af SVEND KRÆMER*)

1. Introduktion

Simulation kan undertiden være et nyttigt hjælpemiddel til analyse og forståelse af komplicerede systemer, hvorved en forbedret styring eventuelt kan opnås. Vi skal i denne artikel konstruere en simulationsmodel til illustration af de styringsaktiviteter, som foregår i en produktionsvirksomhed. Set ud fra en realistisk synsvinkel er der foretaget visse forenklinger af problemstillingen. Vi antager imidlertid, at virksomheden fremstiller flere færdigvaretyper, hvortil der medgår flere eventuelt fælles råmaterialer. Men endvidere antages det, at der kun kan fremstilles een varetype i løbet af en planlægningsperiode (f. eks. en uge). Efterspørgslen antages at være stærkt sæsonpræget og påvirket af modesvingninger.

De ligninger, som indgår i modellen og som beskriver de forskellige relationer mellem styringsaktiviteterne i produktionsvirksomheden, danner grundlaget for et edb-program. Udskrifter fra dette program er anført i afsnit 7 til illustration af, hvorledes forskellige strategiske beslutningsregler påvirker såvel virksomhedens evne til at imødekomme efterspørgslen som det økonomiske resultat for en bestemt tidsperiode.

Modellens kardinalpunkter udgøres af arbejdsstyrke-, produktions- og råmaterialebeslutningerne. Disse tre beslutningstyper er kvantificerede i henhold til især, Holt, Modigliani, Muth og Simon's lineære beslutningsmodel [4]. Det er imidlertid ikke formålet her at løse produktionsstyringsproblemet analytisk (en sådan løsning er udviklet i [4]), men derimod at beskrive forskellige måder, som et bestemt produktionssystem kan styres efter, samt at udvikle et edb-program til simulation af styringsaktiviteterne i et forenklet produktionssystem. Formålet er imidlertid også at give læseren et indtryk af de krav, som et integreret produktionsstyringssystem stiller til indhold og organisation af virksomhedens informationssystem.

*) Cand. merc., The University of Wisconsin, Madison.

De principper, som bør lægges til grund for konstruktionen af et integreret produktionsstyringssystem, beskrives i afsnit 2. Afsnit 3–6 indeholder en beskrivelse og diskussion af simulationsmodellens kvantitative relationer og beslutningsregler. I afsnit 7 vises simulationens numeriske resultater.

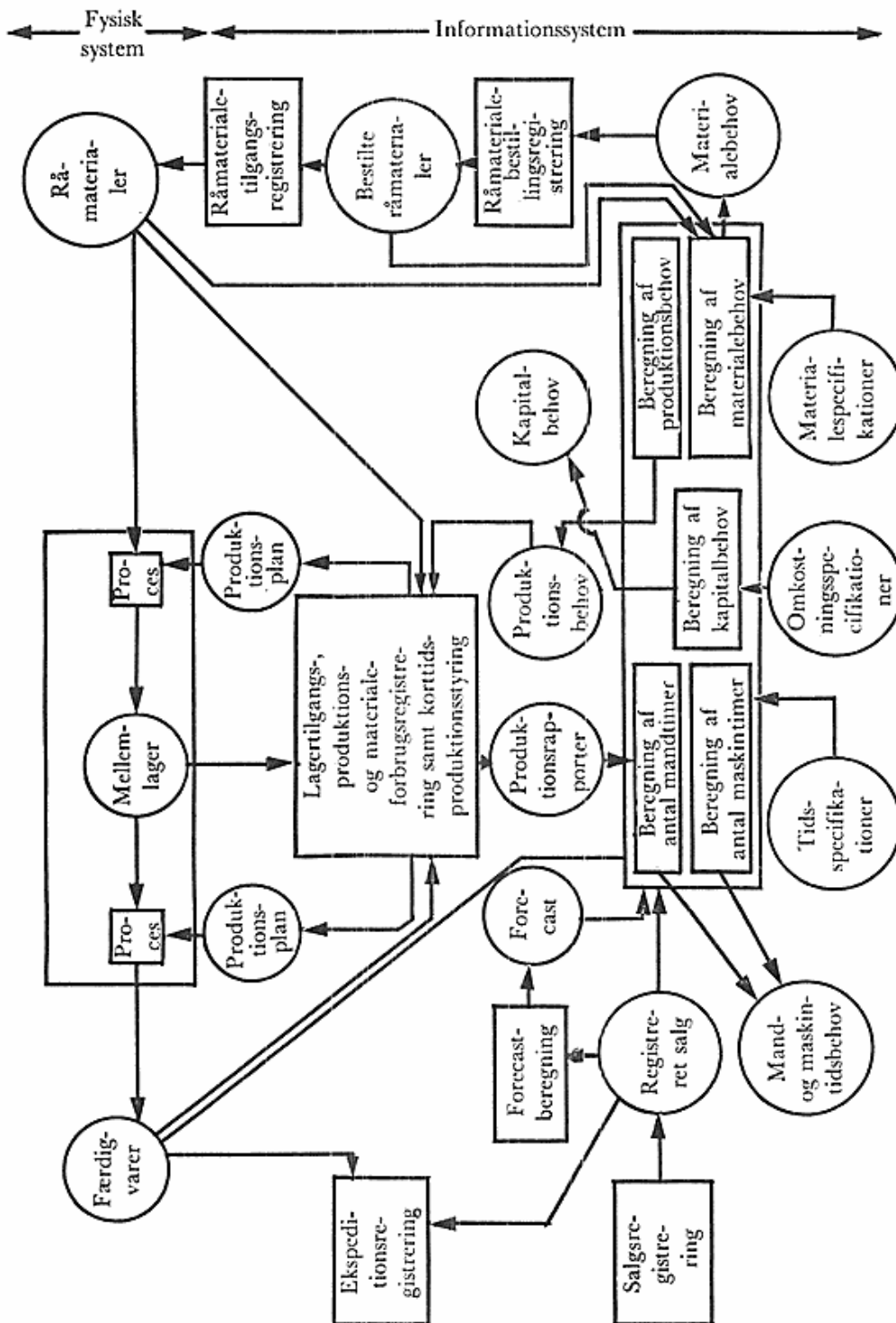
2. Design af produktionsstyringssystemer

Konstruktionen af et styringssystem for en produktionsvirksomhed, som på grundlag af et råmaterialelager producerer en eller flere færdigvarer, må indeholde en analyse af de aktiviteter, som et sådant system består af, og en fastlæggelse af disse aktiviteters logiske sammenhæng.

Men før aktiviteterne defineres, er det relevant at bestemme de tidsperioder, som aktiviteterne vedrører. Vi vil her skelne mellem

- 1) Planlægning på langt sigt (Målfastsættelse): denne planlægning vedrører beslutninger om især investeringer, produktpolitik og -udvikling samt markedspolitik. Til disse beslutninger, som må antages at påvirke virksomhedens udvikling adskillige år frem i tiden, stilles der store krav til informationssystemet, men især ledelsens ønsker og forventninger spiller ind.
- 2) Planlægning på kortere sigt: det antal produktionsperioder, som virksomheden ønsker at tilrettelægge produktionen for, vil vi kalde *planlægningshorisonten*. Den vil alt efter virksomhedens natur sædvanligvis ligge mellem 3 og 18 måneder. Planlægningshorisonten kan fastlægges efter eventuelle periodiske svingninger i efterspørgslen som sæsonvariationer, eller den kan fastlægges efter andre for virksomheden væsentlige kriterier. Det vil dog meget ofte være efterspørgslen, som bestemmer planlægningshorisonten, idet resourcebehovet må afledes af den forventede efterspørgsel. Især de til planlægningshorisonten knyttede aktiviteter vil blive belyst af simulationsmodellen.
- 3) Planlægning på kort sigt: denne detailplanlægning vedrører de ugentlige eller daglige styringsbeslutninger. Hertil hører tids- og belastningsplanlægningen samt materialeindkøbsbeslutningen. Vi skal ikke i simulationsmodellen nærmere belyse tids- og belastningsplanlægningen.

Vi vil inddele styringssystemets aktiviteter i to hovedgrupper: 1) de registreringsmæssige og 2) de styrende aktiviteter.



Figur 1: Registreringsaktiviteterne i et forenklet produktionssystem.

De registreringsmæssige aktiviteter omfatter

- 1) Salgsregistrering
- 2) Ekspeditionsregistrering
- 3) Lagertilgangsregistrering
- 4) Produktionsregistrering
- 5) Materialeforbrugsregistrering
- 6) Råmaterialetilgangsregistrering
- 7) Råmaterialebestillingsregistrering

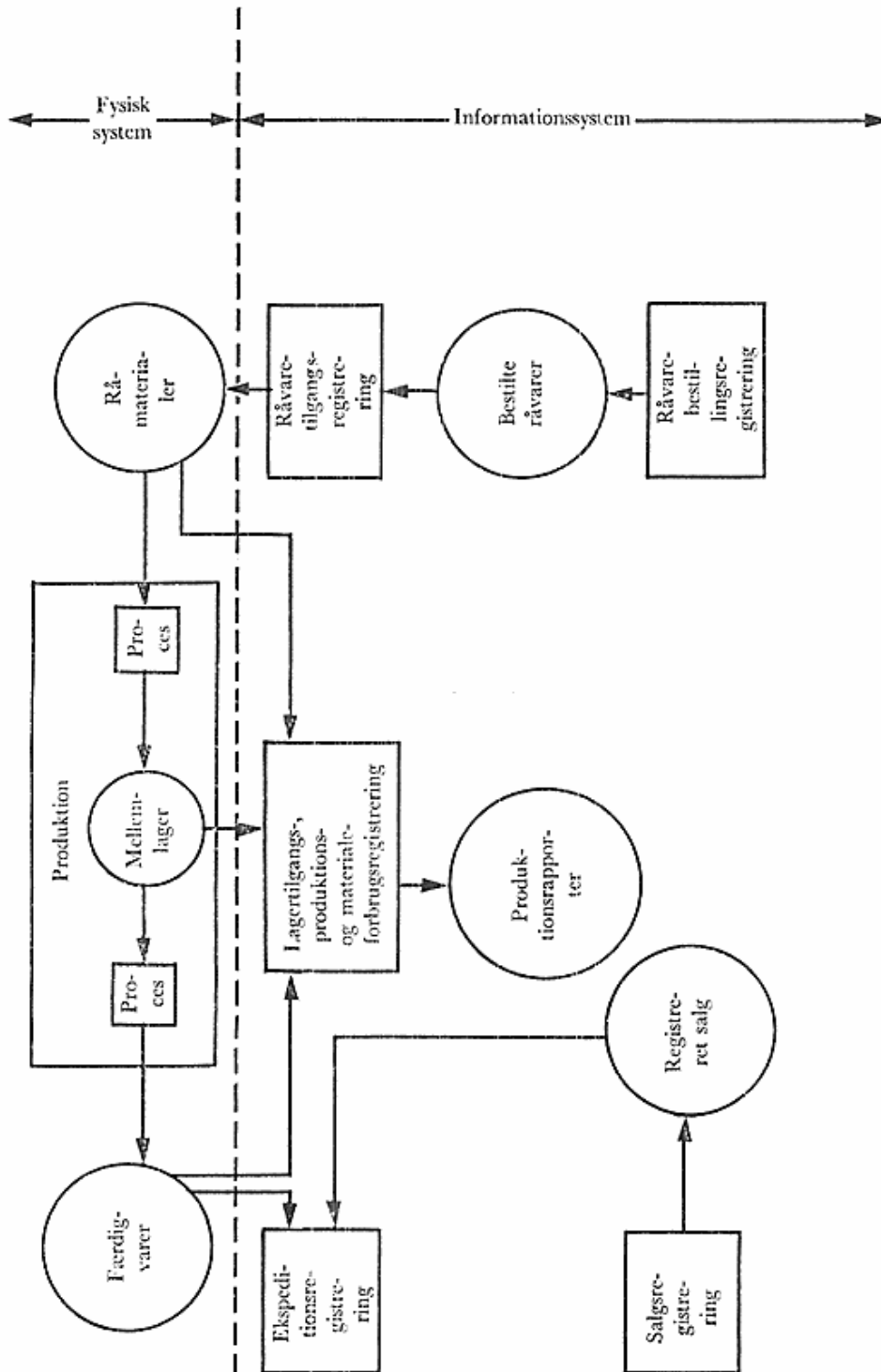
I figur 1 illustreres den logiske sammenhæng mellem virksomhedens forskellige beholdninger. Ændringer af disse beholdninger udtrykkes, som det fremgår af figuren, af de registreringsmæssige aktiviteter.

Virksomhedens styrende aktiviteter for planlægningshorisonten omfatter tilsvarende

- 1) Forecast af efterspørgslen for den kommende planlægningshorisont for de forskellige varegrupper
- 2) Beregning af produktionsbehov for den kommende planlægningshorisont
- 3) Planlægning af ressourcerne for den kommende planlægningshorisont udtrykt i
 - a) mandtimer
 - b) maskintimer
 - c) kapitalbehov
 - d) materialebehov

Vi har hermed defineret såvel de registreringsmæssige som de styrende aktiviteter i produktionsstyringssystemet og kan nu beskrive dette ved en udvidelse af figur 1 med de styrende aktiviteter. Resultatet af en sådan udvidelse ses af figur 2. Sammenhængen mellem aktiviteterne i denne figur skal nu beskrives:

På grundlag af salgsregistreringen foretages forecast af efterspørgslen for den kommende planlægningshorisont. Endvidere kan der her udføres en korttidskontrol med efterspørgslen, hvilket kan medføre korrigerende af forecastet for planlægningshorisonten.



Figur 2: Det udvidede informations- og styringsystem.

Planlægningen af resourcebehovet (antal mandtimer, maskintimer, kapital- og materialebehov) må have forecastberegningen samt det eventuelle eksisterende færdigvarelager (fratrasket de ikke opfyldte salgsordrer) som grundlag. Det samme grundlag gælder for beregningen af produktionsbehovet. Men som grundlag for resourcebehovet må endvidere oplysninger om mand- og maskintidsforbrug indgå, og til beregning af kapitalbehovet kræves oplysninger om timelønninger, maskintidsomkostninger og materialcomkostninger. Det beregnede produktionsbehov nedbrydes til behov for materialer. Som grundlag for denne nedbrydning benyttes materialspecifikationer med oplysninger om hvilke materialer, som medgår til produktion af en færdigvareenhed. Dette grundlag må endvidere suppleres med oplysninger om den eksisterende materiale- og materialeordrebeholdning, samt om materialeleveringstiderne.

Af de beslutninger, som styringssystemet er grundlag for, udgør fastlæggelsen af resourcebehovet den mest betydningsfulde for planlægningshorisonten. Resourcebehovet danner det konkrete grundlag for fastlæggelse af produktionskapaciteten. Ud fra de hermed givne kapacitetsrammer må den detaljerede ugentlige eller daglige planlægning foretages.

3. Simulationsmodellens strategiske beslutninger

De tre generelle strategiske beslutninger, hvis konsekvenser søges belyst ved hjælp af simulationsmodellen, er følgende:

- (1) *Arbejdsstyrkebeslutningen*: vil der på grundlag af realiseret og/eller forventet salg være grundlag for afskedigelse eller ansættelse af arbejdskraft.
- (2) *Produktionsbeslutningen*: hvilke varetyper og i hvor stor mængde skal der produceres i løbet af den næste planlægningsperiode på grundlag af realiseret og/eller forventet salg, arbejdsstyrke og råvarelager.
- (3) *Råvarematerialebeslutningen*: vil der på grundlag af realiseret og/eller forventet salg, lagre af færdige varer, lagre af varer i produktionsprocessen og på grundlag af de eksisterende råmaterialelagre være grundlag for bestilling af flere råmaterialer.

3.1. Arbejdsstyrkebeslutningen

Såfremt lageromkostningerne omfattende såvel over- som underdækningsomkostninger er væsentlige, kan det være fordelagtigt at variere arbejdsstyrken fra periode til periode i henhold til variationer i salget. En

sådan politik vil imidlertid ofte være vanskelig at realisere. Selv om det kan lade sig gøre at skaffe den ønskede arbejdskraft, vil en udvidelse imidlertid sædvanligvis forårsage yderligere omkostninger som følge af oplæring og reorganisation. Også en eventuel indskrænkning af arbejdsstyrken kan være årsag til yderligere omkostninger som følge af tab i arbejdermoral, reorganisation, m. v.

Forskellige kvantitative udtryk for omkostningerne ved ændringer i arbejdsstyrken er foreslået i [4] og [9]. Vi vil benytte det i [9] foreslåede:

$$(1) \quad CHF = C2 \times \text{abs}(R(t) - R(t-1))$$

hvor $R(t)$ er arbejdsstyrken på tidspunkt t , og $C2$ er en omkostningsparameter.

Når salget for flere fremtidige planlægningsperioder er kendt, eller såfremt pålidelige forecasts kan udføres, kan den nødvendige arbejdsstyrke fastlægges for disse perioder. Da en af de grundlæggende forudsætninger for den her beskrevne model er, at efterspørgslen er stærkt sæsonpræget, vil en sæson være berettiget som *planlægningshorisont* for tilrettelæggelse af produktionen. Såfremt vi da regner med to halvårslige sæsoner, vil vi kun overveje ændringer af arbejdsstyrken to gange om året.

Idet $SF(i,t)$ betegner et forecast for det akkumulerede salg for varetype i for tidspunkt T , kan den nødvendige arbejdsstyrke for planlægningshorisonten $T-t$ beregnes som (jvf. f. eks. [2])

$$(2) \quad R = \sum_{i=1}^m (SF(i,t) \times a(i)) / (T-t)$$

hvor $a(i)$ er mandtidsfaktoren for den i 'te varetype. R er da udtrykt i tidsenheder pr. planlægningsperiode t . Såfremt forecastberegningen er tilstrækkelig præcis, vil efterspørgslen nu altid kunne imødekommes med hensyn til arbejdskraft. Det vil dog være at forvente, at der i løbet af planlægningshorisonten akkumuleres såvel færdigvarclagre som underdækkede salgsordrer. Men de afsluttende værdier af sådanne positive eller negative lagre vil nærme sig til nul.

3.2. Produktionsbeslutningen

Produktionsprocesserne må udføres således, at efterspørgslen imødekommes i videst mulig udstrækning under hensyn til den givne produktionskapacitet og arbejdsstyrke, samt råmaterialelageret. Virksomhedens produktionskapacitet med hensyn til arbejdsstyrke og råmaterialer er givet som

$$(3) \quad \begin{aligned} CAP_{ar}(i) &= \sum_{j=1}^n R(j)/a(i,j) \\ CAP_{rm}(i) &= \sum_{h=1}^r z(h)/b(i,h) \end{aligned}$$

hvor $z(h)$ er lageret af råmaterialetype h og $b(i,h)$ enhedsråmaterialefaktoren. Vi har endvidere indført forskellige arbejdskrafttyper benævnt som $j = 1, 2, \dots, n$.

Vi vil nu bestemme produktionskapaciteten $CAP(i)$ for den næste planlægningsperiode, når vi ikke tager hensyn til eventuel overtidsarbejde:

$$(4) \quad CAP(i) = \min[CAP_{ar}(i), CAP_{rm}(i)]$$

Produktionsbehovet for periode t er givet som

$$(5) \quad N(i,t) = s(i,t) - x(i) - y(i)$$

hvor $s(i,t)$ er salgsordrerne for varetype i til levering ved afslutningen af periode t ; $x(i)$ og $y(i)$ er henholdsvis færdigvarelageret og lageret af varer i produktionen.

Da vi antager, at der kun kan produceres een varetype i løbet af en planlægningsperiode t , må vi kunne beslutte hvilken varetype, som skal produceres i den kommende periode. Vi vil overveje følgende to strategier:

- (1) vælge den varetype, som har det største produktionsbehov,
- (2) vælge den varetype, som bidrager mest til virksomhedens indtjening, hvor indtjeningen vurderes ved beregning af $N(i,t) \times pr(i)$; $pr(i)$ er dækningsbidraget eller salgsprisen for varetype i .

De specifikke procedurer for disse beslutningsstrategier er vist i afsnit 5.2., som indeholder en oversigt over edb-programmets procedurer.

Som anført i afsnit 2 vil vi ikke i denne model behandle problemerne med selve planlægningen af produktionsprocesserne. Det antages, at disse forløber kontinuerlig efter givne retningslinier og vel tilrettelagte produktionsstyringsrutiner.

3.3. Råmaterialebeslutningen

Optimal styring af råmaterialelageret stiller krav om beregning af ordrepunkter og ordremængder (M, Q). Disse to fra lagerteorien kendte størrelser beregnes som oftest ved minimering af en total omkostningsfunktion

af de to variable M og Q . Den totale omkostningsfunktion antages som regel at være summen af lageroverdækningsomkostningerne, som er tiltagende med (M, Q) , og lagerunderdækningsomkostningerne, som er aftagende med (M, Q) . Såfremt disse to funktioner begge er konvekse, vil også den totale omkostningsfunktion være konveks, således at et og kun et minimum kan bestemmes for den totale omkostningsfunktion [6].

4. Simulationsmodellens stokastiske grundlag

Vi antager, at salget for en bestemt varetype er begrænset til en bestemt sæson, således at et eventuelt færdigvarelager af denne varetype efter afslutningen af en sæson er uden værdi.

Det sæsonmæssige efterspørgselsmønster for alle varettyper antages at følge en kendt binomial fordeling. Salgsordrer genereres fra periode til periode i løbet af en salgssæson, som har en længde på 20 perioder. Leveringen af disse ordrer finder sted fra den 13. til den 29. periode i sæsonen – altså 8 perioder før salgssæsonen er afsluttet og indtil 8 perioder efter (jvf. figur 3). Det akkumulerede salg beregnes for hver periode t i salgssæsonen fra en normalfordeling med gennemsnit XB og en standardafvigelse på SB enheder (se f. eks. [7] og [8]). Denne totale salgsordreværdi multipliceres derpå med efterspørgselsmønsterværdien for periode t :

$$(6) \quad d(i,t) = (\text{sqrt}(-2 \times \log(\text{random}(n))) \times \cos(2 \pi \times \text{random}(n))) \times SB + XB) \times p(t); \quad i = 1, 2, \dots, m,$$

hvor $\text{random}(n)$ er et tilfældigt tal mellem 0 og 1, og $p(t)$ er efterspørgselsmønsteret givet som

$$(7) \quad p(t) = \binom{T}{t} \times p^t \times (1-p)^{T-t}; \quad t = 1, 2, \dots, T$$

(T er antal perioder i salgssæsonen).

Vi må tage specielt hensyn til de tilfælde, hvor der ved hjælp af (6) genereres negative salgsordrer. Selvom XB og SB kan vælges således, at det er lidet sandsynligt, at negative salgsordrer fremkommer, vil et sådant tilfælde aldrig kunne udelukkes. Vi vil imidlertid da sætte $d(i,t) = 0$.

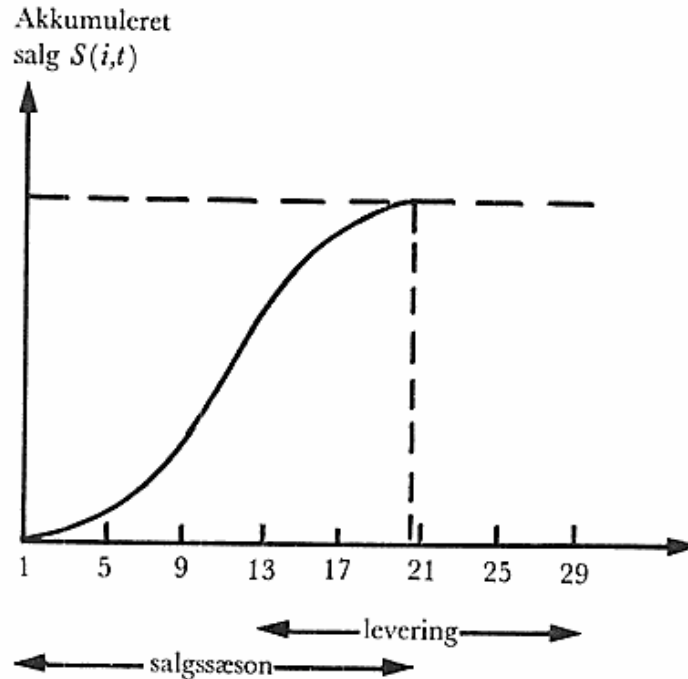
De således fremkomne periodiske salgsordrer antages at være tilfældigt fordelt over k leveringsperioder fra sæsonens 13. til 28. periode:

$$s(i,x) = s(i,x) + d(i,t)/k$$

hvor x er et heltal i intervallet (13|28) og beregnet fra udtrykket

$$x = 16 \times \text{random}(n) + 13$$

Såfremt $t < 13$, vil en x -værdi mindre end t blive tildelt værdien $t+1$, dvs. øjeblikkelig levering.



Figur 3: Salgsforløbet for varetype i .

5. Beslutningsreglerne i simulationsprogrammet

Strukturen i simulationsprogrammet fremgår af funktionsdiagrammet i figur 4, som er konstrueret i henhold til figur 2. Modellens endogene variable indgår i de som logisk formulerede ledelsesbeslutninger vedrørende arbejdsstyrken, produktionen og råmaterialerne. De endogene variable omfatter derfor:

$x(i)$	:	færdigvarelageret
$y(i)$	:	lageret af varer i produktionsprocessen
$z(h)$	:	råmaterialelageret
$N(i)$	:	produktionsbehovet
$v(h)$	:	råmaterialebehovet
$R(j)$	:	arbejdsstyrkebehovet
$TQ(h)$	:	mængden af bestilte råmaterialer
$M(h)$	:	råmaterialebestillingspunktet
$Q(h)$	:	råmaterialebestillingskvantum

Foruden de endogene variable indeholder modellen følgende exogene variable:

1. Genererede variable

$d(i,t)$: salgsordrerne for varetype i genereret i periode t

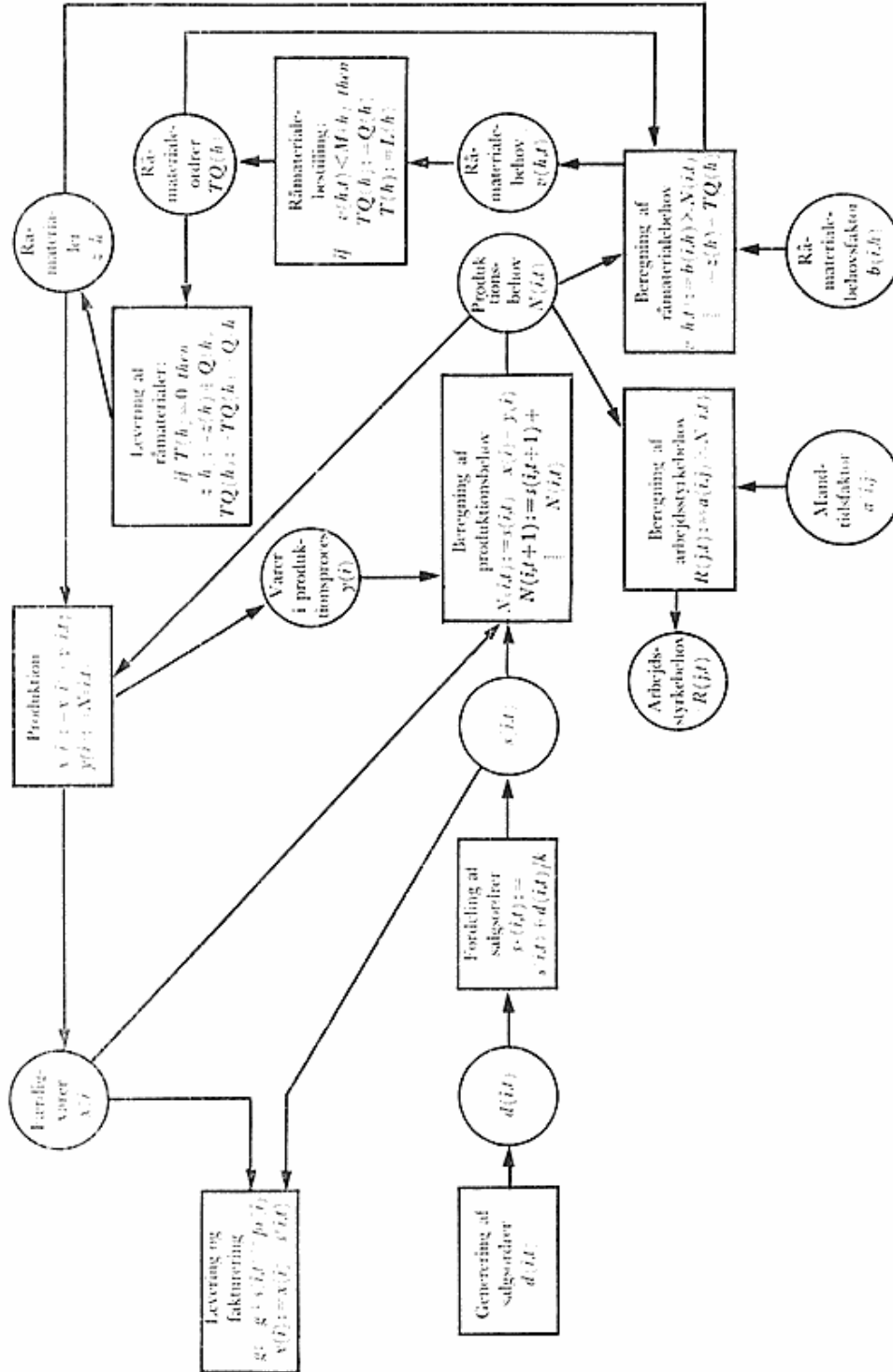
2. Deterministiske variable

$XB(i)$ og $SB(i)$: det gennemsnitlige totale salg og standardafvigelsen herfra
 k : antal perioder over hvilke $d(i,t)$ fordeles
 p : given sandsynlighed, som bruges ved beregning af efterspørgselsmønstret
 $b(i,h)$: enhedsråmaterialebehovsfaktoren
 $a(i,j)$: mandtidsfaktoren
 $L(h)$: leveringstid for råmaterialer
 $pr(i)$: enhedssalgspris
 $c(h)$: enhedsomkostning for råmaterialer
 $w(j)$: omkostning pr. mandtime
 $sh(i)$: lagerunderdækningsomkostning
 $F(t)$: faste omkostninger for periode t

Fodtegnenes betydning og område er følgende:

$i = 1, 2, \dots, m$: antal varetyper
 $h = 1, 2, \dots, r$: antal råmateriale typer
 $j = 1, 2, \dots, n$: antal arbejdstyper
 $t = 1, 2, \dots, T$: antal perioder i salgssæson for ordreoptagelse
 $t = t_0, t_0 + 1, \dots, N$: antal perioder hvor leveringerne finder sted.

De fem sidst anførte variable bevirker, at økonomiske beregninger kan inkluderes i modellen. Således danner likviditetsbehovet for arbejdsstyrken og råmaterialelageret samt salgsindtægterne grundlag for en cash flow rapport. Denne beregning foretages for hver periode t . Desuden beregnes et udtryk for det økonomiske resultat ved afslutningen af en sæson i henhold til



Figur 4: Funktionsdiagram for simulationsmodellen.

$$\begin{aligned}
 (8) \quad G(N) = & \sum_{t=1}^N [\sum_{i=1}^m (\min[x(i), s(i,t)] \times pr(i) + \min[x(i) - s(i,t), 0] \\
 & \times sh(i)) - \sum_{h=1}^r c(h) \times Q(h) \times \max[-T(h) + 1, 0] \\
 & - \sum_{j=1}^n w(j) \times R(j,t) - C2 \times \text{abs}(\sum_{j=1}^n R(j,t) - R(j,t-1)) \\
 & - F(t)]
 \end{aligned}$$

hvor variabelen $T(h)$ angiver antal resterende perioder, før råmaterialer af type h leveres. $T(h)$ sættes lig med værdien af $L(h)$ ved en ordreafgivelse og reduceres derpå med 1 for hver periode, indtil leveringen finder sted.

Maksimering af $G(N)$ under hensyn til de forskellige kapacitetsbegrænsninger er nu en mulig målsætning. Ved hjælp af simulationsteknikken vil vi imidlertid alene søge at belyse, hvorledes ændringer af de beslutningsvariable, som ledelsen kan variere, påvirker G .

5.1. Beslutningsregler vedrørende arbejdsstyrken

Vi antager, at ændringer i arbejdsstyrken kun finder sted en gang for hver sæson, samt at overtidsproduktion ikke er tilladt. Endvidere antages det, at virksomhedens maskinkapacitet altid er tilstrækkelig. Derfor angiver $R(j)$ -værdierne den for os relevante produktionskapacitet.

Det er en strategisk beslutning at bestemme, hvornår i sæsonen en eventuel ændring af $R(j)$ skal foretages. I afsnit 7 vises det, hvorledes det totale økonomiske resultat for en sæson varierer med denne beslutning.

Den procedure, som i edb-programmet benyttes til bestemmelse af $R(j)$ er følgende:

En forecastberegning for $S(i,T)$ foretages på tidspunkt

$$(9) \quad t = t_o - \text{max1}$$

hvor værdien af max1 vælges for hver udførelse af simulationen. Forecastet baseres derefter på det givne efterspørgselsmønster

$$(10) \quad SF(i,T) = S(i,t)/P(t)$$

hvor $P(t)$ er den kumulative værdi for det i henhold til (7) givne efter-

spørgselsmønster, og $S(i,t) = \sum_{v=1}^t d(i,v)$. Vi kan nu beregne den nødven-

dige arbejdskraft som

$$(11) \quad R(j) = \frac{\sum_{i=1}^m [SF(i,T) \times a(i,j)]}{(N-t)}$$

5.2. Beslutningsregler vedrørende produktionen

Produktionsberegningen i (5) indeholder alene behovet for periode t . Da produktionsbeslutningen for periode t også påvirker leveringsdygtigheden for flere fremtidige perioder, bør de salgsordrer, som skal leveres i de efterfølgende perioder, medtages i beregningen. I edb-programmet beregnes behovet altid for sæsonens resterende perioder, og vi får følgende udtryk til denne beregning

$$(12) \quad N(i,t) = s(i,t) - x(i,t) - y(i,t) + \sum_{k=t+1}^N s(i,k)$$

Det er en strategisk beslutning at vælge den varetype, som skal produceres i periode t . Som anført i afsnit 3.2 vil vi vælge mellem to strategier. De økonomiske resultater af at benytte disse to strategier hver for sig er vist i afsnit 7. De to udtryk til beregning af den varetype k , som skal produceres i periode t , er følgende

$$(13) \quad \text{strategi 1: } N(k,t) = \max[N(1,t), N(2,t), \dots, N(m,t)]$$

$$(14) \quad \text{strategi 2: } N(k,t) = \max[N(1,t) \times pr(1), N(2,t) \times pr(2), \dots, N(m,t) \times pr(m)] / pr(k)$$

Vi må nu undersøge, om råmaterialelageret indeholder tilstrækkelige råvaremængder til, at de $N(k,t)$ -enheder kan produceres. For at kunne sammenligne disse kvantiteter må vi transformere $N(k,t)$ til råmaterialeenheder ved hjælp af $b(k,h)$. Efter en eventuel reduktion af $N(k,t)$ som følge af råmateriale-mangel foretages der derefter en sammenligning mellem $N(k,t)$ og den til produktion heraf nødvendige arbejdsstyrke. Såfremt den nødvendige kapacitet er mindre end den ved $R(j)$ givne, samtidig med at $N(k,t)$ er blevet reduceret som følge af manglende råmaterialer, vil vi undersøge, om vi eventuelt ved at vælge en anden varetype kan få produktionskapaciteten udnyttet. Denne undersøgelse sker i edb-programmet ved at gå tilbage til (13) eller (14), som altså da kan blive gentaget m gange. Såfremt vi ikke kan finde en produkttype, som opfylder betingelserne, vil der ikke blive produceret i periode t . Et algol-program, som indeholder denne algoritme, er anført i [5].

Efter således at have bestemt $N(k,t)$ som den mængde, der skal produceres i periode t , kan vi ajourføre lagerbeholdningerne for råmaterialer og varer i produktionen:

$$(15) \quad z(h) = z(h) - N(k,t) \times b(h,k)$$

$$(16) \quad y(k) = N(k,t)$$

og færdigvarelageret ajourføres ved begyndelsen af periode $t+1$:

$$(17) \quad x(k) = x(k) + y(k).$$

5.3. Beslutningsregler vedrørende råmaterialerne

Produktionsbehovet transformeres til behov for råmaterialer ved hjælp af råmaterialefaktoren $b(i,h)$. Råmaterialebehovet beregnes derefter for den resterende del af leveringsperioden under hensyn til råmaterialelageret:

$$(18) \quad v(h,t) = \sum_{i=1}^m N(i,t) \times b(i,h) - z(h).$$

Vi antager, at der ikke bestilles nye råmaterialer, før eventuelle varer i ordre er leverede, hvilket undersøges ved hjælp af variabelen $TQ(h)$, som indeholder et evt. bestilt materialekvantum. Beslutningen om eventuel bestilling af råmaterialer, når et ordrepunkt $M(h)$ og et ordrekvantum $Q(h)$ er givet, har da følgende formulering

1. Hvis $v(h,t) + M(h) > 0$ og $TQ(h) = 0$, gå da til pkt. 2 ellers til pkt. 4.
2. Hvis $z(h) \leq \max z(h)$, gå da til pkt. 3 ellers til pkt. 4.
3. Sæt $TQ(h) = Q(h)$ og $T(h) = L(h)$.
4. Slut.

Betingelsen $z(h) \leq \max z(h)$ er kapacitetsbegrænsningen for råmaterialelageret.

5.4. Ekspedition af færdigvarer

For hver periode t , medens leveringerne finder sted ($13 \leq t \leq 28$), vil der blive leveret $s(i,t)$ enheder, såfremt denne mængde er til stede på færdigvarelageret. I modsat fald leveres den mængde, som findes på lageret, og en eventuel underdækning overføres til næste periode mod beregning af underdækningsomkostningerne $uc(i)$. Disse beregninger udføres ved hjælp af følgende udtryk

$$(19) \quad x(i) = \max[x(i) - s(i,t), 0]$$

$$(20) \quad s(i,t+1) = s(i,t+1) + \max[s(i,t) - x(i), 0]$$

$$(21) \quad uc(i) = \max[s(i,t) - x(i), 0] \times sh(i).$$

6. Simulationsprogrammets struktur og udførelse

Udførelsen af de enkelte aktiviteter i hver planlægningsperiode t må i simulationsmodellen foretages i henhold til bestemte logiske principper. Følgende algoritme viser den rækkefølge, som disse aktiviteter udføres efter i edb-programmet.

1. Initialiser alle kontrol- og styringsvariable med de ønskede værdier.
2. Sæt $t = t + 1$.
3. Generer salgsordrer hvis $t < 21$, jvf. (6) – (9).
4. Udfør arbejdsstyrkeændring hvis $t = 21 - \max 1$, jvf. (10) og (11).
5. Undersøg om levering af råmaterialer finder sted, jvf. (8) og afsnit 5.3.
6. Ajourfør færdigvarelageret og udført færdigvareekspeditionen hvis $13 \leq t \leq 28$, jvf. (17) og (19) – (21).
7. Bestem den varetype, som skal produceres, jvf. afsnit 5.2.
8. Ajourfør lagerbeholdningerne for råmaterialer og varer i produktionen, jvf. (15) og (16).
9. Undersøg om der skal bestilles råmaterialer, jvf. afsnit 5.3.
10. Skriv perioderapport (se tabel 1).
11. Gå til pkt. 2 hvis $t < 29$.
12. Skriv sæsonrapport hvis $t = 29$.
13. Sæt $t = 0$ hvis $t = 29$.
14. Gå til pkt. 2 hvis simulationen ønskes fortsat for flere sæsoner.

7. Numeriske resultater

Ved at foretage udskrift af virksomhedens beholdninger fra periode til periode gennem flere sæsoner kan vi få oplysninger om, hvorledes givne beslutninger indvirker på f. eks. det økonomiske resultat i henhold til (8), systemets evne til at imødekomme salgsordrer, m. v. Simulationen udførtes med følgende parameterværdier:

$$m = 4 \text{ (dvs. 2 varettyper i hver sæson)}, n = 5 \text{ og } r = 4.$$

Efterspørgselsgennemsnit og standardafvigelser

i	$XB(i)$	$SB(i)$
1	2000	500
2	2500	500
3	3000	500
4	2500	500

tid	t1	t2	s(1)	s(2)	s(3)	s(4)	x(1)	x(2)	x(3)	x(4)	y(1)	y(2)	y(3)	y(4)	z(1)	z(2)	z(3)	z(4)	R(1)	R(2)	R(3)	R(4)	R(5)	BACK	SHIP	G(t)	PRD	K	
33	33	9	.	.	861	724	0	0	510	324	0	0	194	0	3504	372	0	2556	348	214	225	68	27	0	0	-1703	194	3	
34	34	10	.	.	1257	1216	0	0	704	324	0	0	0	0	3504	1372	0	2556	348	214	225	68	27	0	0	-5406	0	3	
35	35	11	.	.	1665	1846	0	0	704	324	0	1	0	0	3504	1372	0	6056	348	214	225	68	27	0	0	-7984	0	3	
36	36	12	.	.	2156	2251	0	0	704	324	0	0	0	0	187	3504	1195	1620	4934	348	214	225	68	27	0	0	-11687	187	4
37	37	13	.	.	2390	2521	0	0	635	315	0	0	0	0	187	3504	1998	1252	7312	348	214	225	68	27	0	265	-11357	187	4
38	38	14	.	.	2546	2627	0	0	566	434	0	0	0	0	187	3504	1811	878	6190	348	214	225	68	27	0	137	-5456	187	4
39	39	15	.	.	2619	2706	0	0	544	258	0	0	0	0	187	3504	1624	504	5088	348	214	225	68	27	0	385	-4185	187	4
40	40	16	.	.	2646	2722	0	0	408	86	0	0	232	0	5040	2322	2040	7176	348	214	225	68	27	0	495	-5581	232	3	
41	41	17	.	.	2653	2726	0	0	349	0	0	0	232	0	4576	2160	1576	5784	348	214	225	68	27	118	377	34	232	3	
42	42	18	.	.	2655	2728	0	0	365	0	0	0	0	0	187	4576	1973	1202	4662	348	214	225	68	27	332	216	2319	187	4
43	43	19	.	.	2655	2729	0	0	200	0	0	0	0	0	187	4576	2786	828	7040	348	214	225	68	27	292	352	5105	187	4
44	44	20	.	.	2656	2729	0	0	127	0	0	0	232	0	4112	2534	2364	5648	348	214	225	68	27	267	260	5951	232	3	
45	45	21	.	.	2656	2729	0	0	40	0	0	0	0	0	187	4112	2367	1990	4526	348	214	225	68	27	418	319	10220	187	4
46	46	22	.	.	2656	2729	0	0	0	0	0	0	232	0	3648	3135	1526	6634	348	214	225	68	27	307	227	10501	232	3	
47	47	23	.	.	2656	2729	0	0	0	0	0	0	0	0	187	3648	2943	1152	5512	348	214	225	68	27	450	232	14007	187	4
48	48	24	.	.	2656	2729	0	0	0	0	0	0	232	0	3104	2716	2688	7620	348	214	225	68	27	349	187	12446	232	3	
49	1	25	0	0	2656	2729	0	0	0	0	0	0	0	0	187	3104	2599	2314	6498	348	214	225	68	27	564	232	14319	187	4
50	2	26	1	1	2656	2729	0	0	0	0	0	0	232	0	2720	2297	1850	5106	348	214	225	68	27	463	187	15929	232	3	
51	3	27	2	1	2656	2729	0	0	0	0	0	0	232	0	2256	2065	1386	7214	348	214	225	68	27	653	232	17403	232	3	
52	4	28	7	5	2656	2729	0	0	0	0	0	0	0	0	1806	1840	3386	6089	348	214	225	68	27	678	232	17667	225	1	

Tabel 1: Udskrift fra simulationsprogrammet.

Mandtidsfaktor a

$i \setminus j$	1	2	3	4	5
1	1.0	0.5	1.0	0.25	0.1
2	1.0	1.0	1.0	0.25	0.1
3	1.5	0.6	0.5	0.25	0.1
4	1.0	1.0	1.2	0.25	0.1

Enhedsråmaterialebehovsfaktor b

$i \setminus h$	1	2	3	4
1	2	1	0	5
2	2	0	1	4
3	2	1	2	6
4	0	1	2	6

Råmaterialekvantum, -ordrepunkt og -leveringstid

h	1	2	3	4
$Q(h)$	2000	1000	2000	3500
$M(h)$	1000	1000	500	1000
$L(h)$	4	3	4	2

$\max z = 800$ råmaterialeenheder

Priser og omkostninger

i, j, h	1	2	3	4	5
$pr(i)$	16	17	20	18	.
$c(h)$	2	2	1	0.25	.
$w(j)$	2	2	2	1.5	1

$C2 = 5, sh = 1, F(t) = 0.$

Et eksempel på en udskriftsrapport er vist i tabel 1. Bemærk, at simulationen udføres for to halvårige sæsoner, som overlapper hinanden. Foruden de allerede definerede benyttes følgende symboler i tabelhovedet:

Tid	:	antal perioder simuleret ialt
$t1$	:	periodenummer for sæson 1
$t2$	:	periodenummer for sæson 2
BACK	:	antal underdækkede salgsordrer i perioden
SHIP	:	antal enheder leveret i perioden
PRD	:	antal enheder produceret i perioden
k	:	den varetype, som produceres i perioden.

Det økonomiske resultat for syv sæsoner er vist i tabel 2. Beregningerne er foretaget, når arbejdsstyrkeændringen finder sted 4 perioder før leveringerne skal påbegyndes.

Tabel 2: Det økonomiske resultat for 7 sæsoner med $\max 1 = 4$.

Sæson	Strategi 1: gevinst (8)	Strategi 2: gevinst (8)
1	4 277.50	10 800.50
2	13 881.50	5 231.50
3	-9 203.00	-1 408.00
4	10 863.50	18 276.00
5	9 774.50	-6 132.50
6	4 854.00	4 533.00
7	-1 778.00	-10 277.00
Total	32 670.00	21 023.50

I tabel 3 vises beregninger af det økonomiske resultat for syv sæsoner for begge produktionsstrategier, når $\max 1$ varieres fra 3 til 6 perioder. Desuden vises de beregnede værdier for de ved hver sæsonafslutning ikke opfyldte salgsordrer.

Tabel 3: Det økonomiske resultat og mistet salg for forskellige værdier af $\max 1$.

$\max 1$	Strategi 1:		Strategi 2:	
	gevinst	mistet salg	gevinst	mistet salg
3	37 861	1929	12 401	794
4	32 670	2350	21 023	1915
5	3 043	3029	35 068	1689
6	36 397	1902	27 624	3116

Litteraturhenvvisninger

1. Beer, Stafford, *Cybernetics and Management*, John Wiley and Sons, New York, 1959.
2. Charnes, A., W. W. Cooper, and B. Mellon, "A Model for Optimizing Production by Reference to Cost Surrogates", *Econometrica*, July, 1955, pp. 307-323.
3. Hillier, F. and G. Lieberman, *Introduction to Operations Research*, Holden-Day, Inc., San Francisco, 1957.
4. Holt, Charles C., F. Modigliani, J. Muth, and H. A. Simon, *Planning Production, Inventories, and Work Force*, Prentice-Hall, Inc., N. J., 1960.
5. Kræmer, Svend, A Simulation Model for a Multiitem Production System, (Unpublished Research Report), The University of Wisconsin, Madison, 1968.
6. Lampkin, W. and A. D. J. Flowerdew, "Computation of Optimum Reorder Levels and Quantities for a Reorder Level Stock Control System", *Operational Research Quarterly*, Vol. XIV, 1963.
7. McMillan, G. and R. F. Gonzalez, *Systems Analysis, A Computer Approach to Decision Models*, Richard D. Irwin, Inc., Homewood, Illinois, 1965.
8. Naylor, T. H., J. L. Balintfy, D. S. Burdick, and Kong Chu, *Computer Simulation Techniques*, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1968.
9. Orrbeck, M. G., D. R. Schuette, and H. E. Thompson, "The Effect of Worker Productivity on Production Smoothing", *Management Science*, February, 1968.

Tabel 2: Det økonomiske resultat for 7 sæsoner med $\max 1 = 4$.

Sæson	Strategi 1: gevinst (8)	Strategi 2: gevinst (8)
1	4 277.50	10 800.50
2	13 881.50	5 231.50
3	-9 203.00	-1 408.00
4	10 863.50	18 276.00
5	9 774.50	-6 132.50
6	4 854.00	4 533.00
7	-1 778.00	-10 277.00
Total	32 670.00	21 023.50

I tabel 3 vises beregninger af det økonomiske resultat for syv sæsoner for begge produktionsstrategier, når $\max 1$ varieres fra 3 til 6 perioder. Desuden vises de beregnede værdier for de ved hver sæsonafslutning ikke opfyldte salgsordrer.

Tabel 3: Det økonomiske resultat og mistet salg for forskellige værdier af $\max 1$.

$\max 1$	Strategi 1:		Strategi 2:	
	gevinst	mistet salg	gevinst	mistet salg
3	37 861	1929	12 401	794
4	32 670	2350	21 023	1915
5	3 043	3029	35 068	1689
6	36 397	1902	27 624	3116

Litteraturhenvvisninger

1. Beer, Stafford, *Cybernetics and Management*, John Wiley and Sons, New York, 1959.
2. Charnes, A., W. W. Cooper, and B. Mellon, "A Model for Optimizing Production by Reference to Cost Surrogates", *Econometrica*, July, 1955, pp. 307-323.
3. Hillier, F. and G. Lieberman, *Introduction to Operations Research*, Holden-Day, Inc., San Francisco, 1957.
4. Holt, Charles C., F. Modigliani, J. Muth, and H. A. Simon, *Planning Production, Inventories, and Work Force*, Prentice-Hall, Inc., N. J., 1960.
5. Kræmer, Svend, A Simulation Model for a Multiitem Production System, (Unpublished Research Report), The University of Wisconsin, Madison, 1968.
6. Lampkin, W. and A. D. J. Flowerdew, "Computation of Optimum Reorder Levels and Quantities for a Reorder Level Stock Control System", *Operational Research Quarterly*, Vol. XIV, 1963.
7. McMillan, G. and R. F. Gonzalez, *Systems Analysis, A Computer Approach to Decision Models*, Richard D. Irwin, Inc., Homewood, Illinois, 1965.
8. Naylor, T. H., J. L. Balintfy, D. S. Burdick, and Kong Chu, *Computer Simulation Techniques*, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1968.
9. Orrbeck, M. G., D. R. Schuette, and H. E. Thompson, "The Effect of Worker Productivity on Production Smoothing", *Management Science*, February, 1968.