

Produktionsplanlægningsstrukturen for den serieproducerende virksomhed

»Nil satis – Nisi Optimum«

Af Jørn Wendel Andersen *) og
Palle Crown Rasmussen **)

Resumé

Implementeringsproblemerne i forbindelse med anvendelse af moderne planlægningsværktøjer overvurderes ofte, fordi der mangler nødvendig forbindelse til det etablerede registrerings- og budgetsystem.

Som en erkendelse heraf praktiseres ofte »tommelfingerløsninger« på komplekse problemer. Det er forfatternes opfattelse, at disse løsninger næsten altid vil vise sig at være urimeligt grove beskrivelser af virkeligheden, og følgelig utilstrækkeligt som beslutningsgrundlag.

Komplexiteten bør dog ikke i sig selv medføre anvendelse af for grove løsningsmetoder, og i det følgende vil kort blive skitseret, hvorledes produktionsplanlæg-

*) Cand. merc., chefkonsulent, Teknologisk Institut.

**) Cand. merc., Dansk Esso A/S, Driftsafdelingen.

ningen for en serieproducerende virksomhed kan udformes. De enkelte modeller er oprindeligt konstrueret specielt til anvendelse i en mindre til mellemstor virksomhed indenfor bygge- og boligsektoren.

Alle modeller er udtrykt ved hjælp af matematisk programmering og implementeret i IBM-software, MPSX og MPSX/MIP.

1. Behovet for planlægning

Det eneste relevante argument ved indførelsen af nye styringssystemer er deres værdi som *forbedring af beslutningsgrundlaget* i en valgsituation^{*)}.

Beslutningsparametre i produktionsplanlægning vil typisk være:

Niveau 1: Hvilket produktionsapparat skal anskaffes?

Niveau 2: Hvilke seriestørrelser skal vi producere?

Niveau 3: Hvorledes harmoniserer produktionsrytme og bemanning til afsætningskrav?

Det må således være et uomgængeligt krav til en operationel formulering af et produktionsplanlægningssystem, at det *simultant* skal kunne afveje ovenstående krav.

2. Grovplanlægningen. Niveau 1:

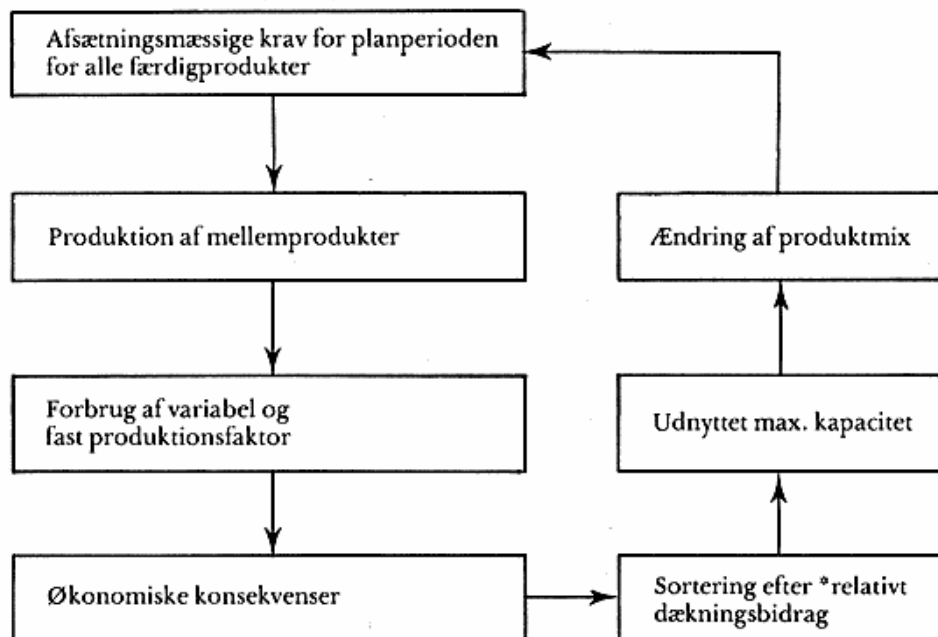
Det er således et krav til modellen, at konstruktionen

- 1) er fleksibel, hvilket søges opfyldt gennem en modulær konstruktion, således at hvert modul redegør for/dækker et nøje afgrænset område i produktionsprocessen.
- 2) at registreringssystemet er tilgængeligt som databank til belysning af øvrige planlægningsproblemer.
- 3) at data er kontrollerede og ajourførte.

^{*)} Langt de fleste planlægningsproblemer (som er født af en knaphedssituation) kan jo enkelt løses ved indførelse af slack-ressourcer (overdimensionering).

2.1. Modelformulering

Herefter har vi valgt følgende modelkonstruktion:



eller på mere stringent form.

$$\max. z = \sum_{i=1}^I p_i x_i - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J(i)} c_{ij} y_{ij}$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J(i)} a_{ijk} y_{ij} \leq b_k \quad \forall k$$

$$\sum_{j=1}^{J(i)} y_{ij} \geq x_i \quad \forall i$$

$$x_i \geq s_i' \quad \forall i$$

$$x_i \leq s_i''$$

$$x_i, y_{ij} \geq 0 \quad \forall i, \forall j$$

*) D.v.s. dækningsbidrag vejet i forhold til kapacitetsforbrug.

hvor

- p_i : salgsprisen for det i 'te færdigprodukt.
- x_i : den producerede mængde af det i 'te færdigprodukt.
- i : index for færdigprodukter, hvor I er øvre grænse.
- c_{ij} : omkostningssats for det j 'te mellemprodukt, der indgår i det i 'te færdigprodukt.
- y_{ij} : den producerede mængde af det j 'te mellemprodukt, der indgår i det i 'te færdigprodukt.
- j : index for mellemprodukter, j , som afhænger af opskriften til det i 'te færdigprodukt. $J^{(i)}$ er øvre grænse i relation til produkt nr. i .
- a_{ijk} : det j 'te mellemprodukts kapacitetsforbrug af ressourcen k , til produktion af det i 'te færdigprodukt.
- b_k : den maksimale ressource mængde af kapacitet nr. k .
- k : index for ressourceudbydende aktiviteter, hvor K er øvre grænse.
- s_i' : minimal produktion af x_i , bestemt via afsætningskravet til x_i .
- s_i'' : maksimal produktion af x_i , (Jfr. ovenfor).

2.2. Rangordningsresultat

Relativ	Produktgruppe	Simpel rangordning		Simultan rangordning
		D.grad %	Rang	Rang
1	P 1	35,6	6	11
2	P 2	34,3	9	7
3	P 3	34,6	8	12
4	P 4	34,0	10	9
5	P 5	32,0	12	8
6	P 6	35,8	5	3
7	P 7	29,8	13	6
8	P 8	37,7	3	5
9	P 9	44,1	1	2
10	P 10	41,2	2	1
11	P 11	35,6	7	4
12	P 12	36,6	4	10
13	P 13	33,9	11	13

Første søjle sorterer de 13 produktgrupper i henhold til disses belastning af produktionsanlægget.

Tredie søjle sorterer produkterne i en simpel eller traditionel rangordning ud fra de enkelte produkters dækningsbidrag i % af deres salgspris (dækningsgrad).

Sidste søjle angiver modellens simultane rangordning, idet *den vejer produkterne efter deres dækningsbidrag, samtidig med at den holder de relevante kapacitetstræk op herimod.*

Det fremgår af ovenstående, at der er signifikante forskelle mellem de to planlægningsmetoder, og at den simple rangordning er helt utilstrækkelig som dimensionerings- og beslutningsgrundlag.

Næste trin i planlægningsproceduren bør søges opfyldt i en serieplanlægningsmodel, hvor der sker en yderligere nedbrydning af grovplanlægningens resultater.

3. Optimalt serievalg. Niveau 2:

Hensyn ved modelkonstruktionen:

1. *At alle produkter indbyrdes konkurrerer om den til rådighed værende produktionskapacitet.*
2. *At de enkelte mulige seriestørrelser for hvert produkt indbyrdes vil konkurrere mellem på den ene side proportionalt kapacitetsforbrug og proportionale lageromkostninger, og på den anden side konstante omstillingstider og -omkostninger.*
3. *At de enkelte mulige seriestørrelser for alle produkter (d.v.s. også mellem de enkelte produkter i modsætning til punkt 2), tillige konkurrerer om kapacitetsforbrug, omstillingstræk og lageromkostninger.*

Det bliver således en model, hvori de enkelte variable indbyrdes kommer i en stærk konflikt, og netop herfor er det åbenbart, at seriestørrelserne må fastlægges simultant.

3.1. Modelformulering

For at kunne tage højde for disse krav, har vi valgt følgende formulering:

$$\begin{aligned} \text{Max } z &= \sum_{i=1}^I (p_i - c_i) x_i - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J(i)} c'_{ij} x_{ij} - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J(i)} c''_{ij} y_{ij} \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^I a_{ik} x_i + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J(i)} a_{ijk} x_{ij} \leq b_k, \quad \forall k \\ & -x_i + \sum_{j=1}^{J(i)} d_{ij} x_{ij} \geq 0, \quad \forall i \\ & x_{ij} - u_{ij} y_{ij} \leq 0, \quad \forall i, \forall j \\ & \sum_{j=1}^{J(i)} y_{ij} = 1, \quad \forall i \\ & x_i \geq s_i', \quad \forall i \\ & x_i \leq s_i'', \quad \forall i \\ & x_i, x_{ij} \geq 0, \quad \forall i, \forall j \\ & x_{ij} \text{ heltallig } \forall i, \forall j \\ & y_{ij} = \begin{cases} 0, & \forall i, \forall j \\ 1, & \forall i, \forall j \end{cases} \end{aligned}$$

hvor

- p_i : salgsprisen for produkt nr. i .
- c_i : de variable produktionsomkostninger for produkt nr. i .
- x_i : angiver den totale produktion af produkt nr. i .
- i : angiver index for de enkelte produkter, hvor I er øvre grænse.
- c'_{ij} : omkostningerne ved omstilling af maskiner m.v. i relation til de enkeltes serievariable (omkostninger pr. serie) d.v.s. serievariabel nr. j til produkt nr. i .
- x_{ij} : angiver antallet af opstarter for produkt nr. i , når serievariabel nr. j vælges.
- j : index for de enkelte serievariable i relation til de enkelte produkter, hvor $j^{(i)}$ er øvre grænse for produkt nr. i .
- c''_{ij} : lagerfinansieringsomkostninger i relation til de enkelte serievariable (angivet pr. serie), d.v.s. serievariabel nr. j til produkt nr. i .
- y_{ij} : angiver en dummy-variabel, der sikrer allokering af korrekte lageromkostninger til den valgte serievariabel.
- a_{ik} : kapacitetsforbruget af den k 'te ressource til produktion af et stk. produkt nr. i .
- a_{ijk} : omstillingsforbruget af den k 'te ressource, når serievariabel nr. j vælges i relation til produkt nr. i . Forbruget angivet pr. serie.
- b_k : angiver den til rådighed værende mængde af ressourcer nr. k .
- d_{ij} : størrelsen af den enkelte serievariabel, d.v.s. størrelsen af serievariabel nr. j , i relation til produkt nr. i .
- u_{ij} : en tilpas stor koefficient, i alle tilfælde mindst lig med den lavest mulige værdi x_{ij} kan antage, således at de øvre afsætningsgrænser(s_i) kan opfyldes.

I den her skitserede modelformulering er de enkelte færdiprodukter symboliseret med x_i og et kapacitetsforbrug på a_{ik} . Ved implementering bør dog model 1's mere detaljerede opbygning anvendes, da

dette kan udføres uden problemer. Yderligere kan der jo blive tale om varianter over samme produkt, som vil være indbygget i model 1, men som ellers vil bortfalde ved model 2's opbygning.

Den her valgte modelformulering er udelukkende foretaget af hensyn til overskueligheden.

3.2. Niveau 3: Fastlæggelse af optimale opstarttidspunkter

Ved udformningen af en model til bestemmelse af opstarttidspunkter for de enkelte serier, skal der tages hensyn til følgende:

- værdien af den afsatte produktion skal maximeres.
- arbejdskraftforbruget må på intet tidspunkt overstige den enkelte periodes kapacitet.
- den anvendte produktion samt periodens primolagre skal kunne honorere efterspørgslen på alle produkter i de enkelte perioder.
- det gennemsnitlige færdigvarelager skal være af en acceptabel størrelse.

3.3. Modelformulering

$$\begin{aligned} \text{Max } z = & - \sum_{i=1}^I \sum_{j=(1-n_i)}^{(J-n_i)} c_{ij} x_{ij} - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J c_{ij}' \cdot 0.5 (w_i + w_{i(j+1)}) \\ & + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J p_{ij} y_{ij} \end{aligned}$$

s. t.

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=(1-n_i)}^{(J+n_i)} a_{ijk} x_{ij} \leq b_k, \forall k$$

$$-d_i x_i(j-n_i) - w_{ij} + w_{i(j+1)} + y_{ij} \leq 0, \forall i, \forall j$$

$$\frac{1}{J} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J c_{ij}' \cdot 0.5 (w_{ij} + w_{i(j+1)}) \leq U$$

$$\begin{aligned}
y_{ij} &= s_{ij}, v_i, v_j \\
w_{i1} &= w_{i1}, v_i \\
w_{ij} &\leq w_{ij}, v_i, v_j \neq 1 \\
x_{ij} &= \begin{cases} 0 \\ 1, v_i, v_j \end{cases} \\
w_{ij}, y_{ij} &\geq 0, v_i, v_j
\end{aligned}$$

hvor

- c_{ij} : angiver totale produktionsomkostninger for produkt nr. i med serieopstart i uge nr. j.
- x_{ij} : angiver serieopstart i uge nr. j af produkt nr. i.
- j : angiver index for ugenummerering, hvor J er øvre grænse.
- n_i : angiver antal produktionsuger for produkt nr. i (sikrer, at serieopstart forud for planlægningsperioden, men med færdigproduktion efter periodens begyndelse er med i modellen). (Analogt men med modsat virkning ved planlægningsperiodens slutning).
- c_{ij}' : angiver lageromkostninger for den gennemsnitlige beholdning af produkt nr. i i uge nr. j.
- w_{ij} : angiver primolager af produkt nr. i i uge nr. j.
- p_{ij} : angiver nettosalgsprovenu for produkt nr. i i uge nr. j.
- y_{ij} : angiver afsætningen af produkt nr. i i uge nr. j.
- a_{ijk} : angiver arbejdskraftforbruget i uge nr. k for produkt nr. i med serieopstart i uge nr. j.
- b_k : angiver den til rådighed værende arbejdskraft i uge nr. k.
- k : index for arbejdsuger, $k = 1 - \max_{(ni)}, 2 - \max_{(ni)}, \dots, K + \max_{(ni)}$, hvor K er øvre grænse for planlægningsperioden.

- d_i : angiver seriestørrelsen for produkt nr. i.
- $x_{i(j-n_i)}$: angiver periodeforskydningen mellem serieopstart og output af færdigprodukter.
- u : angiver som middeltal over planlægningsperioden den maksimale kapital, der kan tillades bundet i færdigvarelager.
- s_{ij} : angiver afsætningskravet for produkt nr. i i uge nr. j.
- w_{i1} : angiver planlægningsperiodens primolager af produkt nr. i (kendes eksakt).
- w_{ij} : angiver for produkt nr. i begrænsningerne på primolager i uge nr. j.

3.4. Modelløsning

De tidspunkter, hvor de enkelte serier senest skal være færdigproduceret, for at den budgetterede efterspørgsel kan honoreres, kan relativt enkelt bestemmes, når der ikke tages hensyn til kapacitetsbegrænsningerne.

Denne fastlæggelse kan netop bestemmes, blot ved en sammenligning mellem planlægningsperiodens primolagre, dens afsætning med hensyn til efterspørgselstidspunkter og de enkelte produkters seriestørrelse*).

En sammenligning af den herved bestemte »løsning«, og model 3's løsning, vil resultere i følgende tabel, hvor de enkelte serieopstart for hvert produkt er angivet ved ugenummer.

Det bemærkes i denne opstilling, at *ikke mindre end 32 ud af 59 serieopstarter er blevet fremskyndet i produktionsafdelingen*, set i forhold til den simple løsning. De serieopstarter, der fremskyndes, er markeret med *.

*) Jfr. Gantt-kort teknik eller linplanlægningsmodeller.

Produkt	Uge nr. Simpel løsning	Uge nr. Model 3's løsning	Produkt	Uge nr. Simpel løsning	Uge nr. Model 3's løsning	
P 1	06	05*	P 8	15	15	
	17	12*		35	32*	
	26	26		50	49*	
	39	37*		P 9	01	-3*
	49	48*			03	03
P 2	02	-1*	05		05	
	08	08	09		08*	
	17	17	13		13	
	23	23	17		17	
	34	34	20		20	
	40	40	22		22	
P 3	04	03*	26		26	
	16	14*	32		32	
	31	27*	35	34*		
	42	40*	38	38		
P 4	06	06	42	42		
	22	14*	45	43*		
	40	38*	48	46*		
P 5	01	01	P 10	04	-1*	
	10	10		32	32	
	20	19*	P 11	13	13	
	33	31*		33	33	
	43	42*		50	48*	
P 6	09	09	P 12	09	02*	
	26	26		27	26*	
	46	42*	47	45*		
P 7	07	07	P 13	05	04*	
	23	23		22	12*	
	42	36*		40	36*	

Vor konklusion er åbenbar: at »tommelfingermetoden« således i alle praktiske tilfælde er urimelig grov og derfor medfører beslutninger om overkapacitet af fast faktor samt bemanning hertil, ligeledes viser det sig, at udnyttelsesgraden af arbejdsstyrken er særdeles svingende over planperioden.

For en typisk mellemstor virksomhed er omkostningerne til overkapacitet og afledte driftsomkostninger helt centrale, og ofte vil tilsyneladende vilkårlige rentabilitetsforskelle kunne forklares alene heri.

4. Modelresultater og modelbrug

Niveau 1:

Modellen tjener to forskellige hovedformål.

For det første er det den praktiske indgang til virksomhedens problemer, og det kræves derfor, at den skal *omfatte en nøjagtig beskrivelse af produktionsprocessen*, samt af de exogene faktorer, som påvirker produktionsprocessen. Hermed danner model 1 en basismodel for den videre analyse.

For det andet skal modellen præsentere selvstændige løsninger på det vigtige *produktmixproblem* samt påvise stærke og svage sider i selve produktionsgangen.

På baggrund heraf fandt vi et *optimalt produktprogram*, som viste sig at være robust over for selv ret kraftige ændringer i forudsætningerne, påvist gennem følsomhedsanalyse af partielle ændringer fra det optimale program samt løsninger af et større antal parametriske kørsler, hvor flere sæt af ændringer belyste løsningens stabilitet.

Derudover fik vi med modellen *identificeret systemets flaskehalse*, og fik dermed værdifuld information om, på hvilke punkter, man især skal sætte ind for at skabe mulighed for en ekspansion på såvel kort som lang sigt.

Vi påviste herefter, at en *rangordning af produkterne*, der samtidig vejer dækningsbidrag i forhold til det enkelte produkts ressourceforbrug, præsenterer en ganske anden løsning end en simpel rangordning efter dækningsbidrag og -grader alene.

Dette punkt anser vi for at være af stor betydning, da rangordningsproblematikken indgår på væsentlige leder i en virksomheds planlægning, f.eks. vedrørende de forskellige salgs- og produkt politikker, der udgår fra virksomheden med basis i en generel produktvurdering.

Modellens konkrete udformning i moduler samt dens store robusthed over for dataændringer, dokumenterer relevansen af at anvende den som basismodel (den lange horisont) for modellerne 2 og 3 samt eventuel yderligere analyse.

Da modellens planhorisont blev synkroniseret med budget-periodens, vil vi i forbindelse hermed understrege model 1's betydning, idet man således direkte kan spore et budgetforslags implikationer for produktionsplanlægningen, og kan dermed på et langt mere solidt grundlag end hidtil opstille og vurdere alternative budgetter og produktionsplaner, blot ved tilføjelse af ekstra økonomirækker efter behov.

Modellen vil således, ud over budget-vurderingskørsler, kræve ændringskørsler efter behov. Det er jo især på afsætningssiden, der bliver tale om hyppige justeringer, efterhånden som prognosegrundlaget forskydes over planperioden.

Niveau 2:

Det er her naturligt, at bruge informationen fra model 1 til en bestemmelse af den optimale seriestørrelse for hvert produkt.

Til det formål konstrueredes model 2, som i modsætning til model 1 måtte benytte sig af diskrete variable for at få beskrevet valgmuligheden som et enten-eller problem.

Vi validerede modelresultaterne ved en sammenligning med den kendte Wilson's formel, og resultatet blev, at 7 seriestørrelser var større end Wilson's, 3 var mindre og 3 lå så tæt på Wilson's som praktisk muligt.

Vi fik således med model 2 påvist to ting. For det første, at de beskrevne afhængigheder i modellen bevirker, at der er tendens til valg af større serier end for Wilson (uden afhængighed), ikke mindst forårsaget af produktionsprocessens flaskehalse.

Modellens resultater vedrører det mellemlange sigt og tager sit udgangspunkt i model 1's løsninger. Så længe basisstrukturen i (1) er uændret, er model 2's resultater således brugbare.

Niveau 3:

Vi fandt det herefter naturligt at fuldende den tidsmæssige nedbrydning fra model 2 til det korte sigt.

Det må derfor fremhæves, at hovedformålet med formuleringen og løsningen af model 3 var at tilvejebringe et bedre beslutningsgrundlag for den tidsmæssige fordeling af de enkelte serier.

Model 3 inkluderede derfor nettoarbejderstyrken for produktionen og vi forudsatte således en relativt jævn udnyttelsesgrad af arbejdsstyrken, der er dog intet til hinder for, at flere og andre kriterier kan lægges til grund ved fordelingen.

Vi påviste, at man ikke ved manuelle, heuristiske metoder kan opnå blot en nogenlunde fordeling af produktionen; antallet af mulige kombinationer umuliggjorde simple rykninger på dette område.

Endvidere præsenterede modelløsningen et usædvanligt lavt lagerniveau, svarende til en omsætningshastighed på 11-13 gange.

Konklusionen må derfor blive, at som basis for direkte produktionsplanlægning på helt kort sigt må model 3 siges at fungere tilfredsstillende.

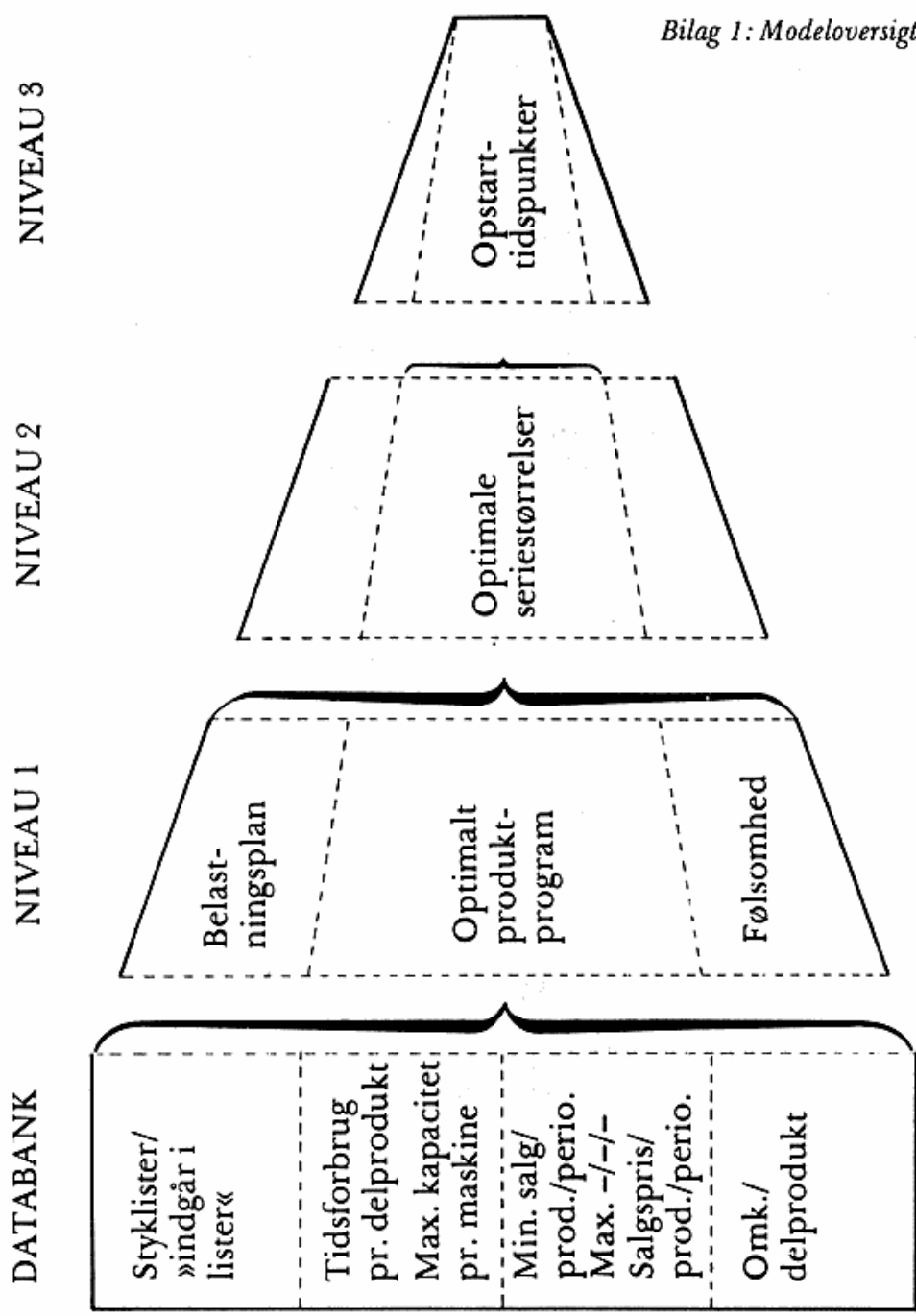
Vi valgte at beskrive en 12 måneders planlægningshorisont for alle tre modeller, hvorved anvendelse af model 3 kan synkroniseres med kørslen af modellerne 1 og 2.

Herudover er der mulighed for daglig brug i konkrete driftssituationer, f.eks. vedrørende ordreaccept og dens effekt på tidsplanen, idet man vil kunne påvise den direkte, økonomiske effekt af at indskyde eventuelt store ordrer i den eksisterende tidsplan.

Endvidere vil vi foreslå, at model 3 køres med 1 måneds interval, dækkende en 3 mdr.'s planhorisont for 0-1 variable og de resterende 9 mdr. med kontinuerte variable, således at forbindelse til virksomhedens normale budgetperiode opretholdes. (Rullende budgettering).

Herved opnår man, efter et antal kørsler, at det bliver lettere at bestemme »rigtige« primo- og ultimo lagerbeholdninger; man får øget information fra den netop forgangne måned samt bedre prognoser for den sidste af de kommende 3 mdr. og opnår derved at skabe sig et mere solidt og et væsentligt billigere beslutningsgrundlag.

Vi vil endelig understrege, at der er en betydelig grad af interaktion mellem de tre modeller. Således godtgør robustheden i model 1, at man kan anvende den som basismodel for (2) og (3), men også fra modellerne (2) og (3) går der påvirkninger til model 1, så den måde, man i praksis skal bruge modelresultaterne, vil bestå af en betydelig grad af interaktion i formulering og resultatvurderingen.



Nødvendigt datagrundlag for niveau 1:

Konstanter og

eksogene var. Navn

p_i : Nettoprovenu pr. prod.

c_{ij} : Variable omkostninger
pr. delprodukt

a_{ijk} : Kapacitetsforbrug
pr. delprodukt

b_k : Kapacitet pr. ressource-
udbyder

s_i' : Minimalsalg pr.
år/produkt

s_i'' : Maksimalsalg pr.
år/produkter

Datakilde/-fangst

Prisliste-rabatter-
markedsvurdering

Materialeforbrug, løn-
forbrug, tidsstudie/efter-
kalkuler, erfaringstal

Tidsstudier/kalkuler,
erfaringstal

Maskinkartotek/
erfaringstal

Salgsstatistikker
+ markedsvurdering

Salgsstatistikker + markeds-
vurdering + salgspolitik,
markedsføringsplan

*Endogene
variable*

x_i : Optimalt færdigprodukt
nr. i

y_{ij} : Delprodukt nr. j som ind-
går i færdigprodukt nr. i